

国际电气工程先进技术译丛

WILEY

光伏系统的PSpice建模

Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice

[西] Luis Castañer
Santiago Silvestre 著
张晓强 张卫平 刘元超 赵一阳 张懋 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

本书特色

本书提供了用PSpice仿真研究PV发电系统主要问题的核心技术，是一部用数值仿真技术研究工程问题的专著。基于通用的电路分析软件——PSpice，本书介绍PV发电系统的定量分析和仿真技术，涵盖了PV系统的主要基础知识和工程应用。其主要内容包括PV系统的光谱响应与短路电流，太阳电池的电气特性，太阳能阵列、PV模块和PV发电组件，PV模块与负载和蓄电池连接的建模，功率调节器和逆变器的建模，最后介绍了独立PV系统和并网PV系统以及小型PV系统。

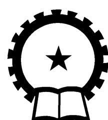
本书适合于从事PV系统、PV电池研究的科研工作人员或企业研发人员参考，同时可作为该专业的高校本科生、研究生和教师的参考用书。



国际电气工程先进技术译丛

光伏系统的 PSpice 建模

［西］ Luis Castañer
Santiago Silvestre 著
张晓强　张卫平　刘元超　赵一阳　张　懋　译



机 械 工 业 出 版 社

本书首先介绍了光伏（PV）系统的一些基本定义和基础理论知识，在此基础上利用计算机仿真软件 PSpice 对 PV 系统进行建模。

本书主要内容包括 PV 系统的光谱响应与短路电流，太阳电池的电气特性，太阳电池阵列、PV 模块和 PV 发电组件，PV 模块与负载和蓄电池连接的建模，功率调节器和逆变器的建模，最后介绍了独立 PV 系统和并网 PV 系统以及小型 PV 系统。

本书适合于从事 PV 系统、PV 电池研究的科研工作人员或企业研发人员参考，同时可作为该专业的高校本科生、研究生和教师的参考用书。

译　者　序

随着化石能源的枯竭和能源损耗量的持续增加，太阳能利用成为全世界关注的热点问题之一。基于通用的电路分析软件——PSpice，本书介绍光伏（PV）发电系统的定量分析和仿真技术，涵盖了PV系统的主要基础知识和工程应用。

全书分为9章。第1章主要介绍太阳辐射、标准光谱和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。第2章介绍光谱响应及其PV电池短路电流的PSpice简化模型。第3章介绍PV电池的伏安特性及其环境影响。第4章分别介绍太阳电池阵列、地面PV模块以及PV发电组件建模方法。第5章介绍PV模块与典型负载匹配以及蓄电池连接的建模。第6章介绍功率调节器与逆变器建模。第7章介绍独立运行的PV系统。第8章介绍并网PV系统。第9章给出若干典型的小功率PV应用系统。

本书提供了用PSpice仿真研究PV发电系统主要问题的核心技术，是一部用数值仿真技术研究工程问题的专著。虽然本书涉及半导体物理学、电力电子学、电工学及计算机仿真等学科的基础知识，但关键问题的叙述通俗易懂，简单实用。所以，译者认为本书可作为电力电子工程技术人员和大专院校师生学习PV发电系统的参考用书。本书在翻译过程中得到了清华大学陈建业教授、浙江大学吴兆麟教授、合肥工业大学张兴教授、北方工业大学杨兵副教授等人的校对，在此表示深深的谢意。本书的出版得到国家自然科学基金项目：光伏发电系统PV阵列串—并联功率优化技术的研究（NO. 51277004）的资助，在此表示感谢。

由于译者对原著的理解不够透彻，难免有“望文生义”之嫌，恳请同行学者及前辈不吝赐教，雅正为盼！

译　者

2014年10月1日

原　书　序

光伏（PV）工程深深植根于半导体物理学中太阳电池的理论和技术，并十分依赖电气与电子工程系统分析和设计，是一个多学科专业。

PV 系统的概念、设计和分析这些重要任务通常需要计算机的帮助以进行快速、准确的计算或模拟。如今的工程师和相关领域的专业人员，甚至不同技术学科的学生也能够使用计算机，并能熟练运用专业软件。计算机辅助技术对 PV 系统有巨大的帮助，因为大多数元器件是非线性的，并且要求解电流和电压值的节点电路方程，通常没有解析解。此外，太阳电池和 PV 发电机的特性强烈依赖于太阳辐射强度和环境温度。因为这些都是随时间变化的变量，如果采用了长期的有辐射和温度的时间序列的系统性能估算值，则在系统设计阶段将会更加准确。

本书的主要目标是帮助理解 PV 系统的运行的相关概念，设计标准和结论，这些同时也使用计算机软件，即 PSpice 进行定义或说明。

书中所述内容已经作为本科课程在西班牙巴塞罗那的 UPC（卡特卢那理工大学）教学内容 10 多年，在与学生的大量互动中，内容逐步准确。1992 年，PSpice 作为一个工具被引入教学过程，来模拟一个基本的太阳电池，之后，硕士和博士生不仅为光伏电池也为 PV 发电机、蓄电池、转换器、逆变器开发出了更详细的模型。在我们教师的印象中，学生迅速掌握了工具，并主动准备使用和应用书中的程序和模型。PSpice 通用版本或更先进的版本十分有助于与学生互动，互动中使课程的发展能够因材施教，同时学生可以把发现的困难反馈给老师。我们认为，教学经验的一个关键特征是，定量的结果都是已有的，从网页得到的 PV 组件和蓄电池的数据值可以使用在问题和练习中，使转换结果接近真实值。

PSpice 是进行模拟信号和混合信号仿真的最流行的权威软件。工程师们依靠 PSpice 进行设计的准确性和鲁棒性分析。大学和半导体制造商使用 PSpice 并提供新器件的 PSpice 模型。PSpice 是一个强大的仿真工具，与 Orcad Capture®，HDL 语言，或 PSpice 原理图构成完整运行环境，可以让工程师创建设计、建立和运行模拟，并分析仿真结果。更多 PSpice 的细节和信息可以在 http：// www. pspice. com / 找到。

同样在这个网站有免费的 PSpice 程序，PSpice 9. 1 学生版可以下载。也可以在 http：//www. pspice. com/download/default. asp 申请免费的 Orcad Lite 版 CD 来得到 PSpice 仿真软件。

PSpice 手册和其他技术文件也可以在上述网站获取 PDF 格式文档。虽然在本书的第 1 章进行了 PSpice 软件的简单使用介绍，我们强烈建议读者去查阅这些手

册以获得更详细的信息。用户还可以在 http：// www. pspice. com/publications/books. asp 找到一个专用于 PSpice 的优秀书籍列表。

本书中出现的为光伏电池和 PV 系统的性能仿真开发的所有模型，都适用于在 PSpice 9 版本下运行。PSpice 提供了一个很好的图表环境，Orcad Capture 提供了可以进行 PSpice 仿真的电路设计界面，尽管如此，本书中所有的 PSpice 模型仍采用可以用作输入文件的文本文件。我们认为，这种选择提供了一个更全面的模型，有助于理解这些模型是如何实现的，并允许快速改写这些模型以适应不同 PV 系统体系结构或根据不同的设计环境改写模型。第二个选择文本文件的原因是，它们很容易被移植到其他现有的 PSpice 版本中。

这里描述光伏电池和 PV 系统的其他组件所有的模型，都可以在 www. esf. upc. es/esf/查找到，在那里用户可以下载本书中所有实例的仿真文件和结果。复现本书部分仿真必要的一组激励、库文件等的相应文档，也可以在上述网站下载。访问本网站需要的用户名为 esf，密码为 esf。

原 书 前 言

随着光伏（PV）系统组件性能提高和由大规模工业生产引起的生产成本降低，PV 发电迅速成为一个成熟的行业。政府和其他的一些机构采取资助安装费用的措施以及部分国家出台一些关于购买并网发电系统的规定及公众环保意识的提高，使得太阳能发电得到广泛应用。

在过去的几年中，PV 发电行业的快速发展引起了全世界对 PV 发电教育培训的兴趣，特别是在系统级上的培训，越来越多的人参与其中。在现有的书本中，PV 系统工程和系统设计通常被认为只是肤浅地介绍了关于 PV 的知识。因此，本书成为了第一本包含计算机建模并进行详细定量分析讲述 PV 系统的书籍。PSpice 软件是一个很好的仿真软件，已被全世界广泛应用于电子电路仿真。因此，可以用它学习 PV 系统或协同解决其设计、尺寸或分析等技术问题。

在大学和专业技术学校中，学生们精通计算机知识，应用计算机辅助学习越来越熟练。通过利用实用友好的计算机软件，使得学生们学习光伏的兴趣被进一步提高，这些软件可以用来求解复杂和非线性方程。由于教学关注概念、标准及结果，因此从事电气工程或电力电子的教育工作者也可以使用这本书中的 PV 案例作为教学参考。

这本书也将有助于协助专业工程师获得 PV 发电专业知识，并允许他们使用书中的这些技术和行为模型。

这本书涵盖了 PV 系统工程知识，第 1 章主要介绍太阳辐射及标准光谱的一些基本知识和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。第 2 章介绍 PV 电池短路电流的 PSpice 简化模型和光电转化效率以及频谱响应等基本概念。第 3 章介绍 PV 电池的伏安特性，并考虑串并联电阻、光照度、温度和空间辐射对太阳电池特性的影响，还对其 PSpice 模型进行了一些修正。这样，就建立了一个可以对任意时刻的光照强度和环境温度等参数进行模拟的太阳电池的行为模型。第 4 章主要介绍太阳电池阵列、地面 PV 模块以及 PV 发电组件建模方法。针对具体问题进行建模和说明，如旁路二极管的使用，太阳电池阵列的部分阴影及安全运行区域介绍。从而将太阳电池行为模型扩展应用到任意大小的发电设备中。第 5 章描述抽水系统和蓄电池的 PSpice 模型，这样模拟出 PV 电池阵列的性能与抽水系统的瞬态响应。第 6 章描述充电调节器、最大功率点跟踪器和逆变器的模型。得到的多天 PV 测量数据被用来与仿真波形进行比较，从而建立逆变器模型，为标准的逆变电路、行为模型及长时间仿真做准备。第 7 章致力于独立 PV 系统，详细地介绍简化计算过程，用每小时辐射时间序列来仿真太阳光辐射一年能量平衡详细情况与系统的长时间响应

过程。随后介绍负载缺电概率，并给出实际的例子。最后，通过提炼得出简化计算方法。第8章作为一个新的问题讲述利用第6章逆变器模型搭建的并网发电系统，并介绍交流PV发电模块和使用这些系统的具体情况。最后，第9章讲述多种情况下的“小型PV产业”，比如一个袖珍计算器在人造光随机有效照射下的工作情况。基于蒙特卡罗方法生成的随机数，生成了随机时间序列的PSpice仿真辐照度，来模拟PV最糟糕一个月的性能。

另外，我们欢迎其他光伏文献的出版发行，相信很多人都会从PV发电文献提出的实用方法中受益。

Martin A. Green
Scientia 教授
PV 工程中心
新南威尔士州，悉尼大学
2002 年 4 月

致　谢

在西班牙 UPC（卡特卢那理工大学），我们 GDS 研究组的多个人都为建立 PV PSpice 软件模型做出了贡献，这里作者要特别感谢丹尼尔·卡尔斯指导的罗蒙德·阿洛伊修斯。他们在电池建模上的工作是完美的、系统的和综合性的。安德烈·莫雷诺和哈维尔·朱丽叶继续这项工作，开发了修订模型，以及特征宏模型，并能够比较长期仿真与大学中 PV 装置的监测实验结果。这些工作增强了对所创模型有效性，仿真环境的实用性的信心，激励了作者写作本书。我们还要感谢那些自 1992 年以来一直有兴趣在 UPC 选修 PV 发电的学生。他们的批评、评论和热情有助我们取得成果。

作者还在 PV 系统建模领域研究合同 TIC97－0949 下得到科学技术部际委员会的支持，促进作者收集所有的材料，增加更多的基本原理和基本内容，形成一本具有可读性的书。

Luis Castañer 和 Santiago Silvestre

目　　录

译者序

原书序

原书前言

致谢

第 1 章　PV 系统与 PSpice 的简介 ······ 1

1.1　PV 系统 ······ 1

1.2　重要的定义：辐射度和太阳辐射通量 ······ 1

1.3　PSpice 基础知识 ······ 3

1.4　用子电路程序简化可移植性 ······ 5

1.5　PSpice 分段线性源和受控电压源 ······ 7

1.6　AM1.5G 标准太阳光谱密度 ······ 7

1.7　AM0 标准太阳光谱密度和黑体辐射对照 ······ 9

1.8　PV 系统能量的输入：可用的太阳辐射通量 ······ 12

1.9　习题 ······ 15

参考文献 ······ 15

第 2 章　光谱响应与短路电流 ······ 16

2.1　介绍 ······ 16

2.1.1　吸收系数 $\alpha(\lambda)$ ······ 16

2.1.2　反射系数 $R(\lambda)$ ······ 17

2.2　太阳电池的解析模型 ······ 18

2.2.1　短路光谱电流密度 ······ 18

2.2.2　光谱光子通量 ······ 20

2.2.3　总短路光谱电流密度及其单位 ······ 20

2.3　短路光谱电流密度的 PSpice 模型 ······ 21

2.3.1　吸收系数的子电路 ······ 21

2.3.2　短路电流子电路模型 ······ 21

2.4　短路电流 ······ 24

2.5　量化效率 ······ 25

2.6　光谱响应 ······ 26

2.7 暗电流密度…… 27
2.8 太阳电池的材料…… 28
2.9 电流密度的叠加…… 29
2.10 DC 扫描图和太阳电池的伏安特性…… 30
2.11 非理想电路模型：串并和分流电阻及其组合项 …… 32
2.12 习题 …… 32
参考文献 …… 33

第 3 章 太阳电池的电气特性 …… 34

3.1 理想等效电路…… 34
3.2 理想太阳电池的 PSpice 模型 …… 35
3.3 开路电压…… 37
3.4 最大功率点…… 38
3.5 填充因子和能量转换效率…… 40
3.6 太阳电池的广义模型…… 42
3.7 太阳电池的广义 PSpice 模型 …… 43
3.8 串联电阻对短路电流和开路电压的影响…… 44
3.9 串联电阻对填充因子的影响…… 45
3.10 并联电阻的影响 …… 47
3.11 复合二极管的影响 …… 48
3.12 温度影响 …… 48
3.13 空间辐射的影响 …… 52
3.14 太阳电池的行为模型 …… 56
3.15 用太阳电池行为模型和 PWL 电源来模拟太阳电池对温度和光照强度时间序列的响应 …… 59
3.15.1 时间单位 …… 59
3.15.2 变量单位 …… 59
3.16 习题 …… 61
参考文献 …… 62

第 4 章 太阳电池阵列、PV 模块和 PV 发电组件…… 63

4.1 介绍…… 63
4.2 太阳电池串联…… 63
4.2.1 相同的太阳电池组合 …… 64
4.2.2 相同的太阳电池在不同光照条件下的组合：热斑问题 …… 64
4.2.3 串联太阳电池中的旁路二极管 …… 65

4.3　太阳电池的并联……67
4.4　地面 PV 模块……69
4.5　PV 模块的标准特性与任意光照和温度条件下特性的转化……73
4.6　单个 PV 模块的 PSpice 行为模型……74
4.7　PV 模块中的热斑问题和安全操作区域……77
4.8　PV 阵列……78
4.9　PV 发电组和 PV 发电站的扩展……81
4.10　习题……82
参考文献……83

第 5 章　PV 模块与负载和蓄电池连接的建模……84

5.1　直流负载直接连接到 PV 模块……84
5.2　PV 水泵系统……85
5.2.1　直流串励电动机 PSpice 电路……85
5.2.2　离心泵 PSpice 模型……86
5.2.3　参数提取……87
5.2.4　一个 PV 阵列—直流串励电动机离心泵系统的 PSpice 仿真……90
5.3　PV 模块连接到一个电池和负载……92
5.3.1　铅酸蓄电池特性……92
5.3.2　铅酸蓄电池 PSpice 模型……95
5.3.3　根据厂家参数调整的 PSpice 模型……100
5.3.4　在现实的 PV 系统条件下的电池模型……101
5.3.5　简化后的 PSpice 电池模型……107
5.4　习题……108
参考文献……109

第 6 章　功率调节器和逆变器的建模……110

6.1　介绍……110
6.2　阻流二极管……110
6.3　充电调节……111
6.3.1　并联调节器……111
6.3.2　串联调节器……115
6.4　最大功率点跟踪……119
6.4.1　基于 DC－DC 降压变换器的 MPPT……120
6.4.2　基于 DC－DC 升压变换器的 MPPT……121
6.4.3　MPPT PSpice 行为模型……122

6.5 逆变器 …… 128
6.5.1 逆变器拓扑的 PSpice 模型 …… 130
6.5.2 与 PV 发电装置直接连接的逆变器的 PSpice 行为模型 …… 136
6.5.3 和电池相连的逆变器的 PSpice 行为模型 …… 141
6.6 习题 …… 145
参考文献 …… 146

第 7 章 独立 PV 系统 …… 148

7.1 独立 PV 系统 …… 148
7.2 等效峰值日照时数的概念 …… 149
7.3 PV 系统中的能量平衡：简化估算 PV 阵列容量的过程 …… 152
7.4 PV 系统中的日常能量平衡 …… 155
7.4.1 瞬时功率失调 …… 155
7.4.2 夜间负载 …… 157
7.4.3 日间负载 …… 157
7.5 PV 系统的季节性能量平衡 …… 159
7.6 独立 PV 系统中的电池容量简化计算方法 …… 160
7.7 随机辐射时间序列 …… 162
7.8 负载不足概率 …… 164
7.9 PSpice 仿真结果与监测结果对比 …… 170
7.10 独立 PV 系统的长期 PSpice 仿真：一个案例研究 …… 173
7.11 水泵 PV 系统的长期 PSpice 仿真 …… 176
7.12 习题 …… 178
参考文献 …… 179

第 8 章 并网 PV 系统 …… 180

8.1 介绍 …… 180
8.2 通用系统 …… 181
8.3 相关技术问题 …… 182
8.3.1 孤岛保护 …… 182
8.3.2 电压扰动 …… 182
8.3.3 频率扰动 …… 183
8.3.4 断路 …… 183
8.3.5 并网失败后的重连 …… 183
8.3.6 注入电网的直流分量 …… 183
8.3.7 接地 …… 183

8.3.8 EMI …… 183
8.3.9 功率因数 …… 183
8.4 并网 PV 系统逆变器的 PSpice 模型 …… 184
8.5 交流模块 PSpice 模型 …… 189
8.6 并网 PV 系统的估算和能量平衡 …… 192
8.7 习题 …… 203
参考文献 …… 203

第 9 章 小型 PV 系统 …… 204

9.1 介绍 …… 204
9.2 小型 PV 系统的特殊要求 …… 204
9.3 辐射度和光通量 …… 204
9.4 光通量和照度 …… 205
9.4.1 距离平方律 …… 206
9.4.2 光通量和照度之间的关系 …… 206
9.5 人造光源产生的 PV 电池短路电流密度 …… 206
9.5.1 照度的影响 …… 209
9.5.2 量子效率的影响 …… 209
9.6 在人造光源照射下 PV 电池的伏安特性曲线 …… 210
9.7 AM1.5G 光谱的照度等效 …… 211
9.8 随机蒙特卡罗分析 …… 212
9.9 典型应用研究：太阳能袖珍计算器 …… 215
9.10 LED 照明 …… 216
9.11 典型应用研究：光信号报警 …… 218
9.11.1 PSpice 产生辐射的随机时间时序 …… 220
9.11.2 闪烁式照明系统的长时间仿真 …… 222
9.12 典型应用：路灯照明系统 …… 225
9.13 习题 …… 226
参考文献 …… 226

附录 …… 227

附录 A 第 1 章用到的 PSpice 文件 …… 227
附录 B 第 2 章用到的 PSpice 文件 …… 236
附录 C 第 3 章用到的 PSpice 文件 …… 239
附录 D 第 4 章用到的 PSpice 文件 …… 244

附录 E　第 5 章用到的 PSpice 文件 …… 253
附录 F　第 6 章用到的 PSpice 文件 …… 254
附录 G　第 7 章用到的 PSpice 文件 …… 258
附录 H　第 8 章用到的 PSpice 文件 …… 267
附录 I　第 9 章用到的 PSpice 文件 …… 269
附录 J　太阳电池基本理论摘要 …… 280
附录 K　任意取向表面辐射的估计 …… 284

第 1 章　PV 系统与 PSpice 的简介

摘要：本章综述了太阳辐射的一些基本知识和通用计算机仿真软件（PSpice）的基础知识。通过定义光谱密度、辐射度和辐射通量简述光伏（Photovoltaic，PV）系统。简要介绍本书中最常用的 PSpice 命令和语句，并使用这些命令和语句将 AM1.5G 和 AM0 太阳光谱写为 PSpice 文件。这个文件用来绘制光谱密度与波长之间的关系曲线，并与黑体辐射比较。太阳辐射到地球表面是本章的另一个内容，本章还绘制出每月和每年在地球上倾斜面所接收的辐射量。本章最后介绍了一些用于系统设计的重要的、有用的规律。

1.1　PV 系统

PV 系统是一个能将太阳能转化为电能的装置。这一基本原则涉及复杂的技术，这些技术用来建立有效的装置，在 PV 系统中，PV 电池是关键部件。生产高效率、低成本的 PV 电池需要半导体处理技术。本书主要研究 PV 电池输出电气特性，而利用数学公式深入研究 PV 电池的相关内容已超出了本书的研究内容。

PV 系统是一个由多个模块组成的模块化系统，既可以将这些模块放大构建一个大系统，又可以将其缩小变为一个小系统。PV 系统的用途十分广泛，其输出功率的等级从 mW 到 MW，其用途从手表到通信卫星、地面太阳能电站以及并网系统。尽管如此，各种用途及功率等级的系统具有相同的工作原理，区别仅限于功率等级大小的特殊限制。

组成 PV 系统的基本模块含有两大部分：其一是电池片/PV 模块以及以适当方式封装与连接的阵列；其二是连接 PV 模块到如下系统的电子装置：

1）独立发电系统的储能装置；

2）并网发电系统；

3）通过合适 DC－DC 或 DC－AC 变换器连接的 DC 或 AC 负载。

在设计和连接这些系统时一定要考虑各个系统的特殊约束条件，同时需要建立特殊模型对其电气特性进行仿真。

1.2　重要的定义：辐射度和太阳辐射通量

波长在 300nm ~ 4μm 范围内的太阳光，在传输过程中部分被大气层反射，部分到达地球表面。所以位于太空（如卫星、飞船）的 PV 发电装置不同于地面上的

装置。外太空的辐射量能量谱密度与满足普朗克法则（Planck’s Law）的黑体的能量谱密度具有相同的形状。然而，由于大气层有选择地吸收了部分波长的能量，因此，地面上太阳能光谱密度不同于太空的光谱密度，用两种特殊的光谱密度区别两者是很有必要的。

1）AM0—外空间的太阳能光谱密度。

2）AM1.5G—在标准条件下位于海平面的太阳能光谱密度。

下面定义一些术语：光谱密度、辐射度和辐射通量。

1）光谱密度 I_λ—在 dλ 波长段内，单位面积内接收的功率，单位为W/m^{2}μm。

2）辐射度—在特定的波长区间，单位面积接收的功率，单位为W/m^2。

3）辐射通量—在特定的时间区间内，单位面积接收的能量，单位为J/m^2—天。最常用的单位有kWh/m^2—天，kWh/m^2—月，kWh/m^2—年，分别表示辐射度在不同的时间内单位面积接受的能量。

图 1-1 给出了 3 个物理量之间的相互关系。



图 1-1　光谱密度、辐射度和辐射通量三者之间的关系

例 1.1　试用面积为0.25m^2 的平面来接收光能。光谱密度简化为一个矩形，如图 1-2 所示。在波长0.60～0.65μm 区间内，幅度为一个常数 1000 W/m^{2}μm；在其余波长区间，幅度等于零。计算辐射度和一天的辐射通量。

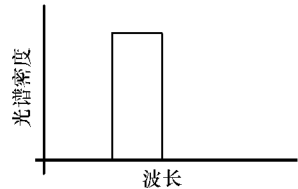


图 1-2　例 1.1 的光谱

解：

在 0.60～0.65μm 波长区间对光谱进行积分，求得辐射度

$$辐射度 = \int_{0.60\mu}^{0.65\mu} 1000\mathrm{d}\lambda = 0.05 \times 1000\mathrm{W/m^2} = 50\mathrm{W/m^2}$$

辐射度是单位面积上接收的功率，与面积本身无关。当接收面积为 0.25m^2 时，每个昼夜接收的功率为辐射量

$$辐射量 = 面积 \int_0^{24\mathrm{h}} 辐射度\ \mathrm{d}t = 0.25 \int_0^{24\mathrm{h}} 50\mathrm{W/m^2}\mathrm{d}t = 0.25 \times 24\mathrm{h} \times 50\mathrm{W/m^2} = 300\mathrm{Wh/天}$$

从 1.1 的例子可以看出，当光谱辐射度不变时，辐射量的计算是非常简单的，因为它只涉及光谱辐射度对时间的积分，也就是说当光谱辐射度在一段时间内是常数时，辐射量的计算变为了光谱辐射度与时间的乘积。

例 1.2　只是用来说明三个重要物理量之间的关系，绝不代表太阳光的辐射

量，其原因是短波的辐射度大于长波的辐射度。当然，辐射度与时间、地点（地球表面经度与纬度）以及天气条件有关。如果计算置于外太空的接收装置的辐射度，则要考虑接收区域、受光面与太阳的倾角和几何、地理以及天文等因素的影响。

很清楚，欲准确地求出辐射度和辐射通量需要更为深入的研究，然而现已有很多计算方法被公布。PV 工程师需要这些信息是为了计算出一个给定面积所能获得的可用太阳能。为了简化分析，提出了太空和地面两种标准太阳光谱密度，分别称为 AM0 和 AM1.5G。附录 A 给出了这两个标准光谱密度及其对应的波长范围。

1.3　PSpice 基础知识

学习 PSpice 软件最好的方法是通过练习简单电路的 PSpice 仿真。我们选择含有单个电阻、电容和二极管的电路阐述如下内容：

1）各种元件的描述；

2）连接的描述；

3）PSpice 的语句书写格式；

4）仿真分析电路的性能。

首先，在逻辑电路图中标注节点编号。我们试图通过下面序列脉冲信号 RC 电路说明仿真过程的几个主要步骤。

步骤 1. 节点编号

根据图 1-3 所示电路编号。

节点（0）为接地点

节点（1）为输入

节点（2）为输出

在 PSpice 程序的 . cir 文件中，节点（0）总是表示为参考节点。

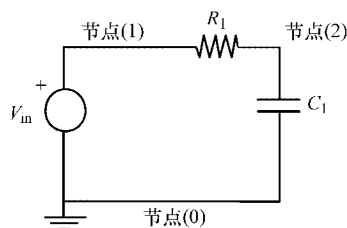


图 1-3　learning. cir 文件所用的电路

步骤 2. 描述电路元件的语句

电阻语句

rxx node_a node_b value

电容语句

cxx node_a node_b value

根据图 1-3 所示电路中的编号，电阻和电容的描述语句如下：

R_1 1 2 1K；电阻 R_1 在节点（1）和节点（2）之间，阻值为 1kΩ

C_1 2 0 1n；电容 C_1 在节点（2）和节点（0）之间，电容值为 1nF

在 Pspice 程序中，注释语句既可以用“;”隔开，放置在电路描述语句的后面，也可以用“*”作为一行的起始符号表示。

电源的描述语句

在一个电路中，电压源是必不可少的元件，下面给出脉冲电源的描述语句。

脉冲电压源语句

vxx node + node − pulse（初值 幅度 延迟时间 上升时间 下降时间 脉冲宽度 周期）

其中 node + 和 node − 是电源的极性，而其他参数不言则明。在图 1-3 所示电路中的电压源对应的语句为

vin 1 0 pulse（0 5 0 1u 1u 10u 20u）

其含义为序列脉冲电压源的正、负极分别与节点（1）和节点（0）相连，脉冲函数的初值为 0V，幅值为 5V，上升、下降时间均为 1μs，脉冲的持续时间为 10μs，周期为 20μs。

步骤 3. 电路分析

PSpice 中提供了多种电路分析方法，分析语句称之为“点命令”，因为其必须以符号“. ”开始。首先介绍瞬态分析。

瞬态分析语句（点命令）

. tran tstep tstop tstart tmax

其中，第一个字符必须为“. ”；tstep 为打印步长；tstop 为终止时间；tstart 为起始时间（可选参数）；tmax 为最大时间间隔（可选的参数）。

在图 1-3 所示电路中，对应的语句如下：

. tran 0. 1u 40u

其含义为设定打印步长为 0. 1μs，终止时间为 40μs。其余两个参数使用默认值。

步骤 4. 输出命令（更多的“点命令”）

当书写完电路的描述语句后，紧接着的是“探针”（. Probe）命令，其功能可以命令计算机将仿真的数据进行绘图以及打印。探针命令的格式如下：

. proble

通常用户希望能够直观地观察仿真结果的波形及其参数。实现该功能的方法是，在“探针”命令之后，使用“绘图”（. plot）命令：

. plot tran vaiable_1 vaiable_2

在图 1-3 所示电路中，我们关心的是输入和输出波形，使用下面的命令：

. plot tran v(1) v(2)

文件需要下面一个结束命令：

. end

图 1-4 给出了图 1-3 所示模拟电路输入和输出的波形，横坐标为时间。瞬态分析可以绘制出仿真图形。

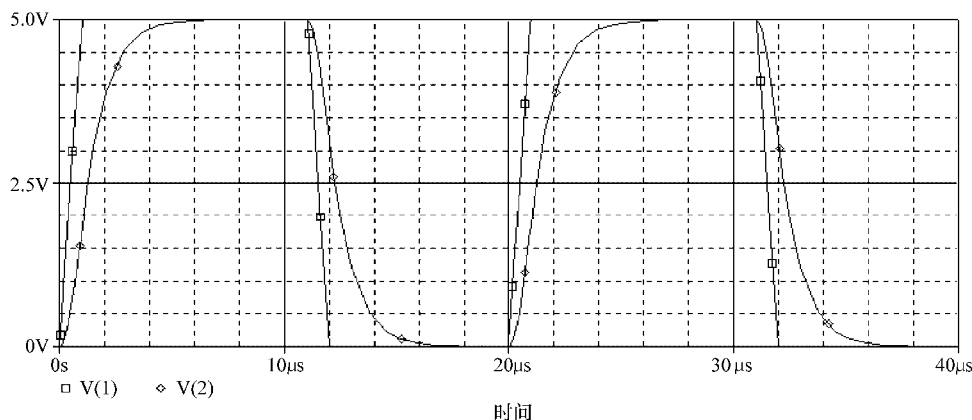


图 1-4　图 1-3 所示模拟电路的输入与输出波形（PSpice 文件名为 learning. cir）

下面直接使用之前介绍的规则和语句给出描述图 1-3 所示模拟电路的启动程序：

```
*learning.cir
r1 1 2 1K; resistor between node (1) and node (2) value 1 KOhm
c1 2 0 1n; capacitor between node (2) and node (0) value 1 nF
vin 1 0 pulse (0 5 0 1u 1u 10u 20u); voltage source between node (1) and node (0)
.tran 0 40u
.probe
.plot tran v(1) v(2)
.end
```

1.4　用子电路程序简化可移植性

上面的例子展示了使用指定节点方法编写电路分析程序的重要性，用户在分析复杂电路时一定要注意，以免重复出现连接错误。对于结构复杂的电路，使用电路描述语句表征其拓扑结构是一件十分繁琐的工作。尤其如果电路存在着几个拓扑结构相同而节点不同的子电路，重复描述显得更加繁琐。因此，PSpice 程序提供了子电路定义和调用功能。当某一模块电路被定义为新的子电路后，用户便可以像调用其他元件一样对其进行使用。

假设需要定义一个如图 1-3 所示 RC 的电路构成的子电路，以便用于复杂的电路，那么可以定义子电路的格式如下：

子电路语句

. subckt name external_node_1 external_node_2 params: parameter_1 = value_1 parameter_2 = value_2

在子电路定义文件中，需要指定外节点数目以及内部元件值，但不包括分析语句（即无点命令）或电源，在后续的电路中将使用该子电路。由此可知，这类子电路文件实质是扩展了的库文件（. lib），随后介绍其使用方法。

描述一个 RC 电路需要两个外节点以及两个参数。请注意文件中的电阻和电容参数值在后续使用这个子电路时是可以修改的。

特别注意：子电路文件中禁止使用参考节点（0）。

定义外节点连接如下：输入节点（11），输出节点（12），虚拟参考地节点（10）。子电路文件如下：

```
*rc.lib
.subckt rc 12 11 10 params: r=1 c=1

r1 11 12 {r}
c1 12 10 {c}
.ends rc
```

到此为止，每当我们在负载电路中遇到 RC 电路，就可以调用上述子电路程序。例如，图 1-5 中有两个不同参数的 RC 电路模块，在输入文件中使用两个语句调用子电路程序，其使用方法为首写字母为“x”加上子电路的名称。

调用子电路程序语句

x_name node－1 node－2 node－i subcircuit_name params: param_1 = value_1

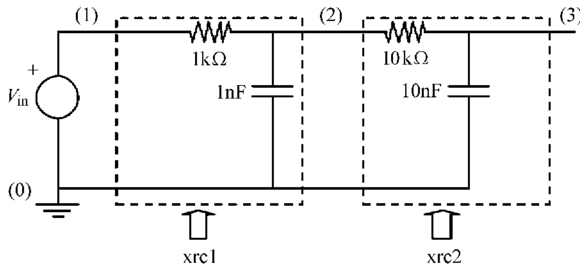


图 1-5　两次使用 RC 子电路的电路图

使用子电路语句描述图 1-5 所示电路中的两个 RC 电路模块如下：

xrc1 2 1 0 rc params: r = 1k c = 1n

xrc2 3 2 0 rc params: r = 10k c = 10n

对照图 1-5 所示电路图，xrc1 和 xrc2 是两个子电路的名称，rc param：后面给定了元件参数。子电路 xrc1 和 xrc2 分别对应的节点为 2，1，0 以及 3，2，0。为了配合调用子电路程序，必须使用另一个“点命令”，其格式如下：

. include rc. lib

整个电路文件如下：

```
* learning_subckt.cir
xrc1 2 1 0 rc params: r–1k c–1n
xrc2 3 2 0 rc params: r–10k c–10n
.include rc.lib
vin 1 0 pulse (0 5 0 1u 1u 10u 20u); voltage source between node (1) and node (0)

.tran 0.1u 40u
.probe
.plot tran v(1) v(2) v(3)
.end
```

1.5　PSpice 分段线性源和受控电压源

在 PV 系统中，系统的输入量为太阳光辐射度和温度，这些参数不便于使用上述单一脉冲电源描述。然而，在 PSpice 中使用分段线性化（PWL）可以描述任意形状 PV 阵列的电气特性。

PWL 电压源描述语句

Vxx　node + node –　pwl　time_1　value_1　time_2　value_2…

这种电源可以非常方便地表征 PV 模块的电气特性，在下一节我们将通过一个实例说明。

在 PSpice 仿真软件及其 PV 仿真系统中，电压控制的电压源，简称为 E – 源（E – device）是一个应用十分广泛的器件，其语句的格式如下：

E – device 语句

e_name　node + node – control_node + control_node_gain

其含义是 node + 和 node – 之间有一个受控电压源，控制端的正极连接 control_node +、负极连接 control_node –，增益为 gain。

更为简化的表达式是将电压源的数值作为一个数学表达式，其语句的格式如下：

E_name　node + node – value = {数学表达式}

1.6 节和 1.7 节将使用这个语句绘制太阳光谱密度图像。

1.6　AM1.5G 标准太阳光谱密度

在标准太阳光谱密度中，AM 的含义是大气层（Air Mass）。AM0 表示外层空间的太阳能光谱密度；AM1.5G 表示在标准条件下位于海平面的太阳能光谱密度。通常对于由下式给定的 x，定义出 AMx 太阳光谱密度：

$$x = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \tag{1-1}$$

式中，ϑ_z 是太阳的天顶角。当 $\vartheta_z=0$，$x=1$ 时，意味着太阳位于观察者的头顶上方，记为 AM1。AM1 表示太阳位于观察地的正上方、天气晴朗无云，在海平面上接受到的太阳光谱密度。地面通常基于 $x=1.5$ 定义太阳光谱密度，对应天顶角为 $\vartheta_z=48.19°$。当接受到面倾斜为 37°时，面对太阳所接受的光谱被命名为“全球－倾斜光谱”。参考文献［1.1］还给出了其他类型的太阳光谱密度的定义，有兴趣的读者可以参阅相关内容。

如果编写一个含有 PWL 电压源的子电路程序，就可以将上述标准的太阳光谱密度转为 PSpice 的一个子电路。图 1-6 提供了 AM1.5G 标准太阳光谱密度的等效电路，对应的子电路文件在附录 A 中，下面列出其中的若干条语句：

```
* am15g.lib
.subckt am15 g 11 10
v_am15 g 11 10 pwl   0.295u  0
+  0.305u 9.2
+  0.315u 103.9
+  0.325u 237.9
+  0.335u 376
+  0.345u 423
+  all data points follow here (see Annex 1 for the complete netlist)

.ends am15 g
```

必须指出，在 PSpice 瞬态分析时，默认的时间轴变为以微米为单位的波长。

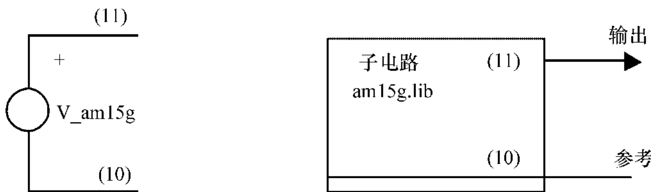


图 1-6　AM1.5G 标准太阳光谱密度的等效电路

为了绘制 AM1.5G 标准太阳光谱密度的图形，编写下面的“.cir”文件：

```
*am15 g.cir
xspectr_irrad 11 0 am15 g
.include am15 g.lib
e_spectr_irrad_norm 12 0 value = {1000/962.5*v(11)}
.tran 0.1u 4u
.probe
.plot tran v(12)
.end
```

在这个文件中，“am15g.lib”子电路被调用来进行瞬态模拟，其时间轴为以微米单位的波长。

AM1.5G 标准太阳光谱密度如图 1-7 所示，单位为 $W/m^2\mu m$。

在本书中请注意 PSpice 仿真生成的图形中各坐标轴所代表的实际物理量及其单位。如图 1-7 所示的光谱密度曲线，在 PSpice 瞬态分析中 y 轴默认的物理量为电压，单位为 V；x 轴默认的物理量为时间，单位为 s。而在图 1-7 中 y 轴对应的实际物理量为光谱密度，单位为 $W/m^2\mu m$；x 轴对应的实际物理量为波长，单位为 μm。在图 1-7 中，y 轴的 1V 对应的实际物理量为 $1W/m^2\mu m$；x 轴 $1\mu s$ 对应的物理量为 $1\mu m$ 波长。在本书中，PSpice 显示图形中单位与实际物理量中单位的转化见表 1-1。

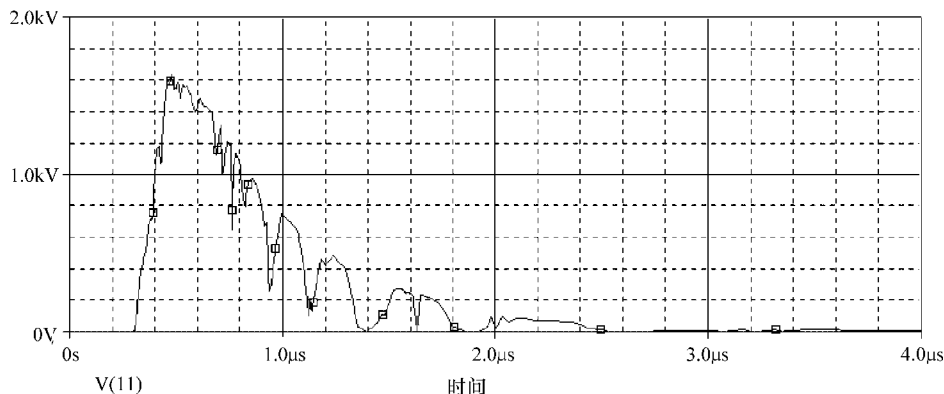


图 1-7 PSpice 绘出的以 $1kW/m^2$ 为标准的归一化的 AM1.5G 标准太阳光谱密度

注：x 轴是以 μm 为单位的波长，y 轴是以 $W/m^2\mu m$ 为单位的光谱密度。

表 1-1 PSpice 中变量的单位及其所代表的实际物理量

	PSpice 中的变量	实际物理量
横坐标 x 轴	时间（μs）	波长（μm）
纵坐标 y 轴	电压（V）	光谱密度（$W/m^2\mu m$）

对于读者，在学习这本书的过程中，要处处注意显示出的曲线的轴包含的实际意义，以避免误解。

1.7 AM0 标准太阳光谱密度和黑体辐射对照

参考文献［1.2］给出的外层空间的 AM0 标准太阳光谱密度的总辐射度为 $1353W/m^2$。对应于标准的 PSpice 子电路与 am15. lib 子电路完全类似，并在附录 A 中给出，同时绘制出如图 1-8 所示图像（文件“am0. lib”和“am0. cir”）。

在距离一个天文单位（$1AU = 1.496 \times 10^{11}m$）外大气层，每平方米所接受的总辐射度被定义为太阳能常数 S，它是对 AM0 光谱密度进行积分后得到的数据，其数值为 $1353W/m^2$。

太阳辐射通量可以近似地表示为一个温度为 5900K 的“黑体”的辐射通量。

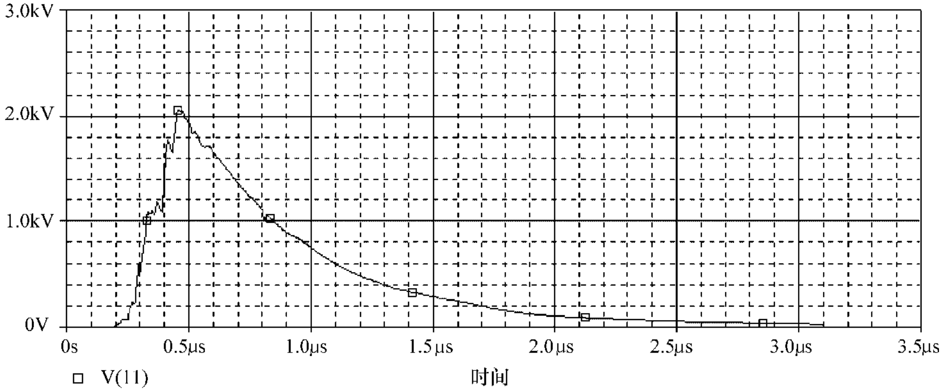


图 1-8　PSpice 绘出的 AM0 标准太阳光谱密度

注：x 轴是以 μm 为单位的波长，y 轴是以 $W/m^2\mu m$ 单位的光谱密度。

普朗克法则给出了光谱密度函数 E_λ，含义为单位面积、单位波长所获得的辐射功率，其定义式如下：

$$E_\lambda = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{hC_0}{\lambda kT}} - 1\right)}(W/m^3) \tag{1-2}$$

式中，h 是普朗克常数（$h = 6.63 \times 10^{-34}$Js），以及

$$2\pi h C_0^2 = 3.74 \times 10^{-16}\,Wm^2$$

$$\frac{hC_0}{k} = 0.0143\,mK \tag{1-3}$$

上式中两个数分别为第一、第二普朗克辐射常数。对所有波长的黑体单位面积的总辐射量由下式求取：

$$\int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma T^4 = 5.66 \times 10^{-8} T^4 (W/m^2) \tag{1-4}$$

式中，温度 T 是绝对温度 K°。

假设黑体具有各向同性辐射特性，则在距太阳一个天文单位所接受到的光谱密度由下式确定：

$$I_\lambda = E_\lambda \frac{S}{\int_0^\infty E_\lambda d\lambda} \tag{1-5}$$

式中，S 是太阳能常数。将式（1.2）代入上式，得

$$I_\lambda = \frac{8.925 \times 10^{-12}}{\lambda^5\left(e^{0.0143/\lambda T} - 1\right)T^4}(W/m^2\mu m) \tag{1-6}$$

为了绘制给定温度条件下黑体的光谱密度，需要扩展上面各节所述的 PSpice 子电路功能。事实上，需要绘制不同温度所对应的光谱密度并计算波长的具体数值。为此，附录 A 首先给出了计算波长的库文件“wavelength. lib”。

这个库文件对应的子电路定义如下：

```
.subckt wavelength 11 10
```

这个子电路有两个节点，节点（11）输出数值的物理量为波长，单位 m；节点（10）为参考节点。其次，我们使用 PSpice 中的 E－device 模型实现式（1-6），其相应的程序如下：

```
*black_body.lib

.subckt black_body 12 11 10 params:t=5900

e_black_body 11 10 value={8.925e-12/(((v(12)*1e-6)**5)*(t**4)
+*(exp(0.0143/(v(12)*1e-6*t))-1))}

.ends black_body
```

上面程序中使用了 1×10^{-6} 因子，将波长的单位由 μm 转化为 m。当有了这些子电路文件后，我们就可以运行下面的 a black_body. cir 文件：

```
*black_body.cir

.include black_body.lib

.include wavelength.lib

x_black_body 12 11 0 black_body

x_wavelength 12 0 wavelength

.tran 0.1u 4u

.probe

.plot tran v(11)

.end
```

在上面的程序中，波长的单位是 m，温度的单位为 K。V（11）给出的数据为光谱密度。仍然可以用 PSpice 文件绘制其图像。图 1-9 给出了黑体、AM0 和 AM1. 5G 的光谱密度。

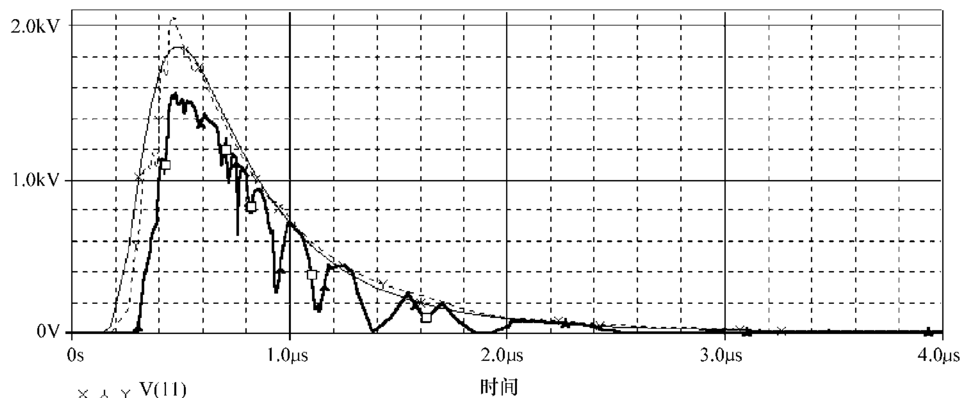


图 1-9 温度为 5900K 黑体的光谱密度（中间）、与 AM0（上面）和 AM1. 5G（下面）光谱密度的比较

注：x 轴是以 μm 单位的波长，y 轴是以 $W/m^2\mu m$ 为单位的光谱密度。

1.8　PV 系统能量的输入：可用的太阳辐射通量

PV 工程师关心的主要问题是在特定位置、倾角、方向以及特定的时间段内 PV 板接受的辐射通量，即可利用的太阳辐射通量，简称为可用辐射通量或辐射通量。可用辐射通量是 PV 系统的能量来源，因此我们须尽可能获得准确的相关数据。它也取决于天气条件以及诸如系统所处的地理位置等。很明显太阳辐射会受到一些不确定性因素的影响，而大多数信息是通过使用复杂的算法对若干年在特定位置获得的测量结果进行处理后所得到的数据。虽然这些信息是某个特定地区的数据，然而却适用于世界的许多地方。对于某个必须安装 PV 系统而又尚无当地可用辐射通量的实际测量数据的地域，工程师可从已有的数据库查到类似的辐射量。有关内容可查阅参考文献［1.3，1.4，1.5］。

可用辐射通量主要依赖 PV 板的安装方位和倾斜角。方位在北半球以正南为标准，而南半球则以正北为基准，通常称之为准天顶（Azimuth）角。倾斜角则是以地平线作为基准的。作为平均位置的辐射数据例子，图 1-10 给出了圣地亚哥位于北纬 33.05°（美国）地区的平均辐射通量。使用参考文献［1.5］提供的 Meteonorm4.0 处理测量数据，可以看出一年内月平均辐射通量值与倾斜角直接相关。测量条件如下：PV 板面向正南方向，即准天顶角等于零，倾斜角为 0°，10°，…，90°。由图 1-10 可知，在夏季，当倾斜角等于零时 PV 板接收的辐射通量最大，其结果意味着在夏季，尽可能使 PV 板水平放置；当倾斜角等于 90°时，除冬天外，其余时间接收的辐射通量最小。

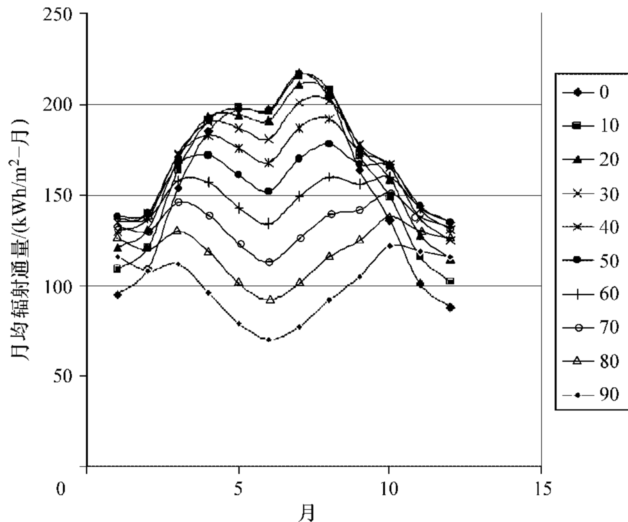


图 1-10　圣地亚哥月平均辐射通量

在设计 PV 板的倾斜角时，以每年获取最大辐射通量为目标。通过图 1-11 可知，在圣地亚哥地区，PV 板面向南接收的辐射通量是倾斜角的函数。可以看到倾斜角近似等于 30°，即接近当地的纬度角时，年辐射通量达到最大值。

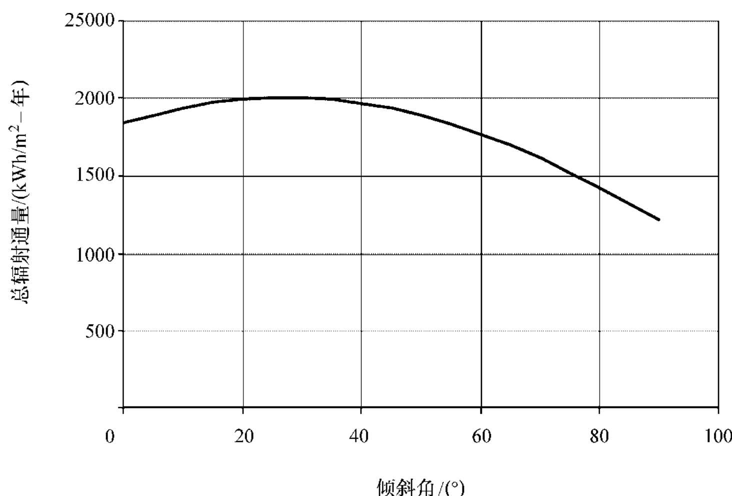


图 1-11　圣地亚哥地区不同倾斜角对应的总辐射通量（PV 板面向正南）

综上所述，可以得出安装 PV 板的一个普遍规律：每年获得最大总辐射通量的条件是倾斜角近似地等于当地的纬度角（称之为纬度原则）。图 1-12 证明了这个规律，在世界四个不同地点测量从倾斜表面接收的年辐射量，即内罗毕的倾斜角为南纬 1. 2°；西德尼的倾斜角为南纬 33. 45°；曼谷的倾斜角为北纬 13. 5°；爱丁堡的倾斜角为北纬 55. 47°；在北半球，PV 板面向正南；在南半球，PV 板面向正北。可以看到在不同纬度的纬度原则近似成立。此外，图 1-11 和图 1-12 更进一步说明，倾斜角的变化对总辐射通量/年的影响不大。为了量化地说明这一结论，使用图 1-13 所示的三维图，底部的两个坐标分别为准天顶角和倾斜角，纵坐标是南欧西班牙某小镇（Logroño）的总辐射通量/年，纬度角等于北纬 40°。

所示结果是基于一个没有聚焦的平板所获取的总辐射通量，并且其位置在一年内是固定不变的。为了提高瞬时辐射通量的利用率，可以使用聚焦和跟踪 PV 系统，跟踪系统又分为单轴和双轴跟踪。参考文献［1.3，1.6］指出，聚焦和跟踪系统需要另外的估算方法，而非上述介绍的单方向算法。

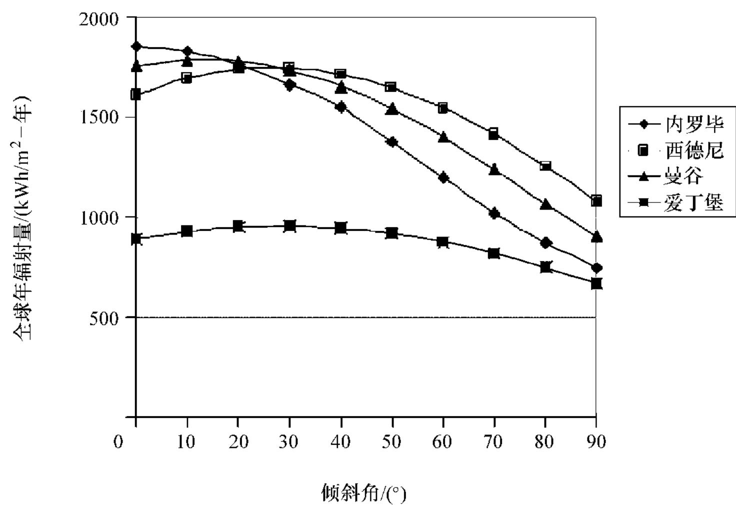


图 1-12　在世界四个不同地区平均辐射量/年与倾斜角之间的曲线

注：内罗毕，南纬 1. 2°；西德尼，南纬 33. 45°；曼谷，北纬 13. 5°；爱丁堡，北纬 55. 47°。在北半球，PV 板面向正南，在南半球，面向正北

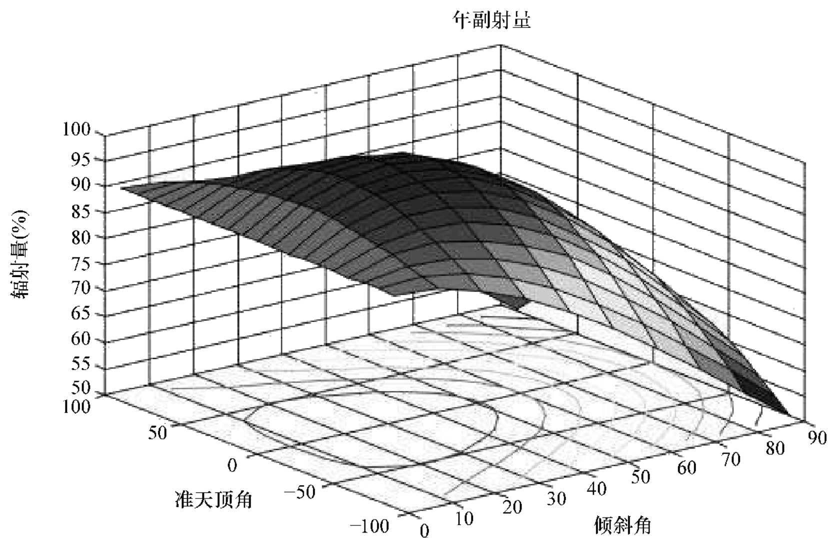


图 1-13　西班牙某小镇（Ågoncillo，Logroño）辐射通量的三维图

注：准天顶角和倾斜的角变化范围为 0° ~90°；% 表示标幺值；底部的投影变化范围为 50% ~95%；使用 Meteonorm 4. 0 软件处理测量数据

1.9 习题

1.1 使用 PSpice 程序绘制 4500K 黑体的光谱密度图。

1.2 基于图 1-11，估算倾斜角等于 90°时所获得的总辐射通量与最大值的百分比。

1.3 依据 AM1.5G 标准光谱，计算出波长变化范围为 0 ~ 1.1μm 的能量。

参 考 文 献

[1.1] Hulstrom, R., Bird, R. and Riordan, C., 'Spectral solar irradiance data sets for selected terrestrial conditions' in *Solar Cells*, vol. **15**, pp. 365–91, 1985.
[1.2] Thekaekara, M.P., Drummond, A.J., Murcray, D.G., Gast, P.R., Laue E.G. and Wilson, R.C., *Solar Electromagnetic Radiation* NASA SP 8005, 1971.
[1.3] Ministerio de Industria y Energía, *Radiación Solar sobre superficies inclinadas* Madrid, Spain, 1981.
[1.4] Censolar, *Mean Values of Solar Irradiation on Horizontal Surface*, 1993.
[1.5] METEONORM, http://www.meteotest.ch.

第 2 章　光谱响应与短路电流

摘要：本章将介绍 PV 电池的基本工作原理及其 PSpice 简化分析模型。将通过若干个范例阐述短路电流的 PSpice 模型、光电转化效率以及频谱响应。介绍太阳电池暗电流的分析模型并将其用来计算 PSpice 内部二极管的模型参数；用反向饱和电流等参数表述短路电流的伏安特性曲线。本章还阐述了 PSpice 直流扫描功能，并用其实现上述功能。

2.1　介绍

本章主要研究两个问题，其一，太阳电池的工作原理；其二，在给定太阳光谱的光谱密度的条件下，用 PSpice 简化模型计算电池的输出电流。电池内部的机理及其相关技术并非本章的重点内容，有兴趣的读者可以阅读参考文献［2.1，2.2，2.3，2.4，2.5］。对于 PV 工程师而言，更感兴趣的是太阳电池是如何工作的以及如何建立一个 PV 转换模型，用来描述因光子与电池表面碰撞而在产生的外电路电流。

太阳电池是由半导体材料制成的。半导体材料具有如下特性：当其表面接收光照时，光子的反射和吸收会在半导体内部产生自由载流子电荷，这些载流子做扩散运动，最终在内电场的作用下漂移而分离（译者注：这种现象简称为半导体的光敏效应）。半导体的特性决定光电转换效率。影响光电转换效率最重要的特性如下：

1）吸收系数。它取决于半导体的带隙值及其特性，分为直接带隙和间接带隙。

2）半导体表面的反射系数。它与半导体表面处理技术有关，包括表面的形状和防辐射层等。

3）漂移－扩散参数。控制载流子向集电极移动，包括载流子的寿命及电子和空穴的迁移率。

4）太阳电池表面少数载流子的复合速率。

2.1.1　吸收系数 $\alpha(\lambda)$

吸收系数取决于所使用半导体的材料，其值范围很大。作为一个例子，图 2-1 给出一个用 PC1D 绘制出的硅、砷化镓和非晶硅这三种不同材料吸收系数值的曲线[2.6]。

由图 2-1 可知，当波长变化时，吸收系数有几个数量级变化。另外，在一段波长范围内（译者注：波长大于约 600nm），硅的吸收系数大于砷化镓和非晶硅；

曲线的形状与半导体材料的性质以及带隙值有关。这些情况对太阳电池的设计有着十分重要的意义，其原因在于光子的吸收率遵循 Lambert 定律。

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-\alpha x} \tag{2-1}$$

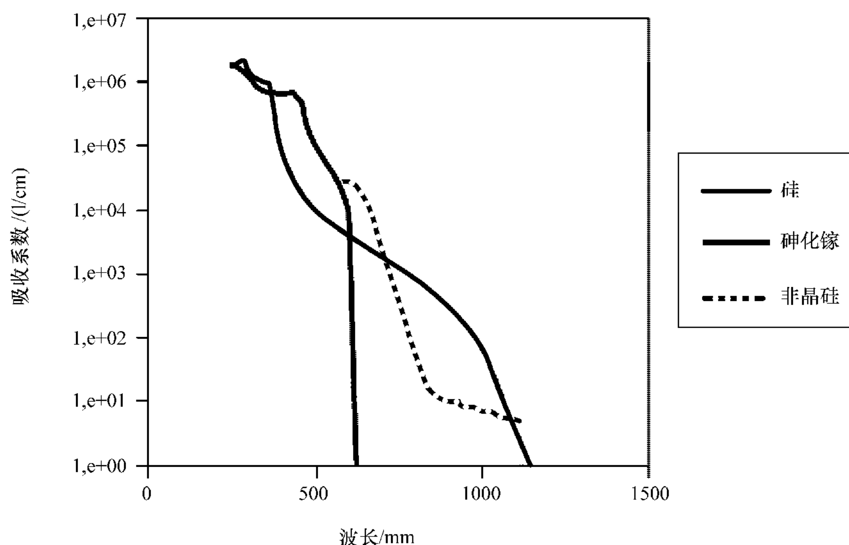


图 2-1　硅、砷化镓、非晶硅的吸收系数与波长的曲线（使用 PC1D 软件绘制曲线[2.6]）

当 α 值较大时，光子在离表面较近的距离被吸收；当 α 值较小时，光子在材料内部穿越的距离较远。在极端情况下，当 $\alpha=0$ 时，所有的光子能够穿越整个半导体材料，一般称这种极端情况为该材料对某个特殊波长是透明的。由图 2-1 可知，对硅材料而言，大于 1.1μm 的红外波长是透明的。考虑到吸收系数形状和具体数值的差异，能够计算出某个特殊材料吸收太阳光谱中大部分光子所需的光路长度，如砷化镓需要若干微米厚度。然而对直接带隙材料，如硅材料，通常所需要的厚度为数百微米。必须指出，在现代硅型太阳电池设计中，电池的内部设置了光限制区域，当硅片减薄到典型值 100μm 时，能提供长光子路径的长度。

2.1.2　反射系数 $R(\lambda)$

太阳电池表面的反射系数取决于硅表面的纹理结构和防反射涂层对空气的折射系数。众所周知，在给定的波长 ϕ，折射系数的最优值，即反射量最小，必须等于两个相邻层中的折射系数的几何平均值。如玻璃封装电池，当波长为 0.6μm 时，反射系数达到最小值 2.3。图 2-2 给出了裸硅电池和安装防反射涂层后的太阳电池的反射系数。对图 2-2 有如下两点说明：其一，使用软件 PC1D 中的PVcell.prm 计算并绘制曲线；其二，带有反射涂层的太阳电池的结构为用 1mm 的玻璃封装，表面涂层厚度为 3μm，反射材料为反射指数是 2.3 的 AR 涂层。

由图 2-3 可以看到，采用适当的防反射设计，太阳电池的体内可以吸收更多的

光子，提高了光电转换效率。

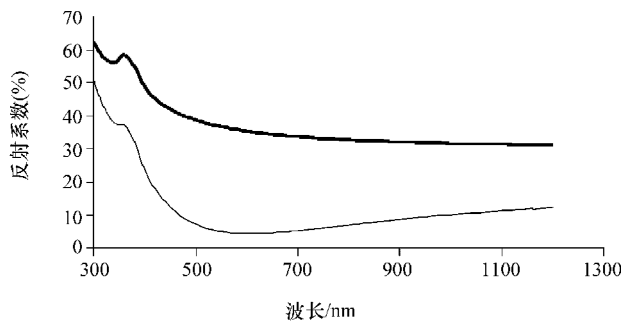


图 2-2　粗线和细线分别为裸硅电池和带有涂层电池表面的反射系数
（使用 PC1D 软件绘制曲线[2.6]）

2.2　太阳电池的解析模型

在给定光谱密度条件下，计算太阳能光子响应需要求解 5 个微分方程组，包括多子和少子的电流方程，连续性方程，以及泊松方程。本书推荐使用新南威尔大学开发的 PC1D 通用软件[2.6]求解这个方程组。用户可以自定义几何形状以及各种参数，使用这个软件计算多种电池的光电效应。PC1D 提供数值解并能给出电池的量化指标，诸如载流子的浓度、电场强度和电流密度等。这个软件不仅为电池设计者带来方便，而且也为 PV 工程师提供了有力的工具。因为这个解析模型可以转换为 PSpice 电路，所以本书旨在使用 PV 电池的解析模型阐述太阳电池内部光电转换机理的基本概念。PSpice 电路可以用图示的方式表示太阳电池的 3 个重要物理量及其相互关系。这 3 个重要的物理量是：

（1）光谱短路电流密度；

（2）量化效率；

（3）光谱响应。

图 2-3 给出了太阳电池的原理示意图，太阳电池的两个区域分别称为发射区和基区。通常，太阳光直接照射到发射区的表面，这个表面仅有小部分被引出电极的金属网格所覆盖。除去引出电极覆盖的面积外，涂有低反射系数的大部分面积可以接收光，从而产生电流。

由图 2-3 可知，假定发射区是 n 型半导体而基区是 p 型半导体，当电池表面接收到光照时，会在外面短路的路径上产生一个如图示方向的电流。如果将 n 型和 p 型半导体互换，则电流方向相反。

假定太阳电池的发射区和基区都是均匀掺杂的，可得到其简化模型。

2.2.1　短路光谱电流密度

我们给出暴露在单色光下的模型，通过外部短路电流计算出 $1cm^2$ 的太阳电池

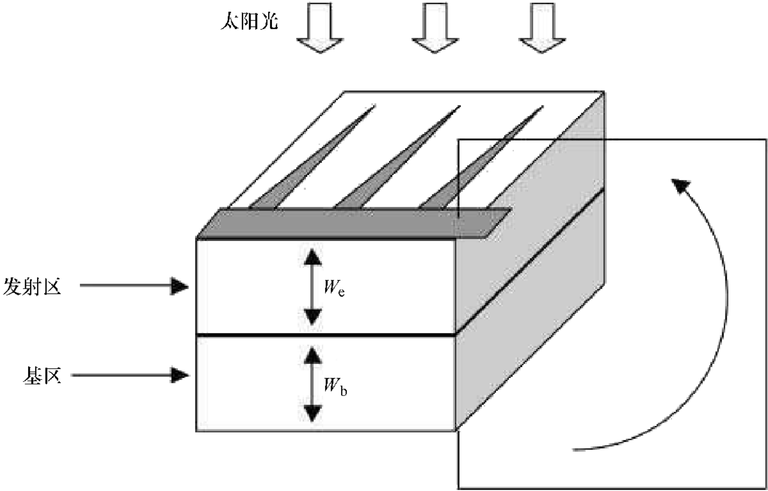


图 2-3　太阳电池外电路短路电流的示意图

收集的光电流值。发射区和基区对电流都有作用，而两者的分析表达式如下（附录 B 给出对太阳电池的基本模型的总结）。

发射极短路光谱电流密度

$$J_{scE}(\lambda)=\frac{q\alpha\phi_0(1-R)L_p}{(\alpha L_p)^2-1}\left[-\alpha L_p e^{-\alpha W_e}+\frac{S_e\frac{L_p}{D_p}+\alpha L_p-e^{-\alpha W_e}\left(S_e\frac{L_p}{D_p}Ch\frac{W_e}{L_p}+Sh\frac{W_e}{L_p}\right)}{Ch\frac{W_e}{L_p}+S_e\frac{L_p}{D_p}Sh\frac{W_e}{L_p}}\right] \tag{2-2}$$

基极短路光谱电流密度

$$J_{scB}(\lambda)=\frac{q\alpha\phi_0'(1-R)L_n}{(\alpha L_n)^2-1}\left[-\alpha L_n-\frac{S_b\frac{L_n}{D_n}\left(Ch\frac{W_b}{L_n}-e^{-\alpha W_b}\right)+Sh\frac{W_b}{L_n}+\alpha L_n e^{-\alpha W_b}}{Ch\frac{W_b}{L_n}+S_b\frac{L_n}{D_n}Sh\frac{W_b}{L_n}}\right] \tag{2-3}$$

式中主要参数的定义见表 2-1。

表 2-1　解析模型中的主要参数

符号	名称	单位
α	吸收系数	1/cm
ϕ_0	发射区表面的光谱光子通量	光子/cm^2 μm · s
ϕ_0'	发射区与基区交界面的光子光谱通量	光子/cm^2 μm · s
L_n	电子在基区扩散的长度	cm
L_p	空穴在基区扩散的长度	cm

（续）

符号	名称	单位
D_n	电子在基区的扩散常数	cm^2/s
D_p	空穴在发射区的扩散常数	cm^2/s
S_n	发射极表面复合速率	cm/s
S_p	基极表面复合速率	cm/s
R	反射系数	—

两个部分的符号相同并且都是正向电流，从基区层流出器件，如图 2-3 所示。

可以看出包含在式（2-2）和式（2-3）中的三个量是波长吸收系数 α，如图 2-1 所示；反射量 $R(\lambda)$，如图 2-2 所示；和光谱密度 I_λ，如第 1 章图 1-9 的函数所示。光谱密度没有明确的包含在式（2-2）和式（2-3）中，而是通过光谱光子通量隐含，如 2.2.2 节所述。

光谱短路电流密度单位是$A/cm^2\mu m$，因为它是单位面积、单位波长的电流密度。基区和发射区产生同方向的电流，且在图 2-3 中外电流是由基区流向发射区的。

2.2.2 光谱光子通量

在太阳电池发射区的表面接收的光谱光子通量 ϕ_0 与光谱密度和波长有关，考虑光谱密度是单位面积、单位波长的功率，则将一个光子的能量用 hc/λ 代入，并整理，得

$$\phi_0 = 10^{16}\frac{I_\lambda \lambda}{19.8}(\text{光子}/cm^2\mu m \cdot s) \tag{2-4}$$

式中，I_λ 的单位是 $W/m^2\mu m$，λ 的单位是 μm。

因为式（2-4）直接给出了单位面积、单位时间光子光谱通量相关的光谱特性与光谱密度的直接关系，所以它是一个很有用的公式。将式（2-4）代入式（2-2）可以很容易地计算出太阳电池发射区产生的光谱短路电流密度。

基区部分的光谱短路电流密度取决于 ϕ_0' 而并非 ϕ_0，因为发射区－基区结或表面光子通量的值要考虑已经发生在发射区层的吸收部分。ϕ_0' 与 ϕ_0 关系如下：

$$\phi_0' = \phi_0 e^{-\alpha W_e} = e^{-\alpha W_e} 10^{16}\frac{I_\lambda \lambda}{19.8}(\text{光子}/cm^2\mu m \cdot s) \tag{2-5}$$

式中的单位与式（2-4）相同，波长单位是 μm。

2.2.3 总短路光谱电流密度及其单位

一旦计算出基区和发射区的光谱短路电流密度，可得到给定波长的总光谱短路电流密度是二者之和，其公式如下：

$$J_{sc\lambda} = J_{scE\lambda} + J_{scB\lambda} \tag{2-6}$$

单位为$A/cm^2\mu m$。太阳电池空间电荷区收集的光电流在式（2-6）中被忽略。

重要的是要记住，当照射太阳电池的波谱光源不是单色光时，光谱短路电流密度和总的短路电流密度是两个不同的数值。这两个数值是波长的积分，如 2.3 节所述。

2.3　短路光谱电流密度的 PSpice 模型

在编写 PSpice 程序时，短路光谱电流密度的最简模型是分段线性化（PWL）的电源，包括了 3 个与波长有关的物理量：光谱密度、吸收系数和反射系数文件。在下面实例中，假设所有波长的反射常数等于 10%。

2.3.1　吸收系数的子电路

在附录 B 中，子电路文件名为“silicon_ abs. lib”，描述了硅的吸收系数，其中含有具有相同结构的光谱密度文件“am15g. lib”和两个外部节点，即内部节点（11）和参考节点（10）的吸收系数的值。其方框图如图 2-4 所示。

从图 2-4 中可以看出，放置在内部节点（11）和参考节点（10）之间的分段线性电压源与波长吸收系数值的对应关系，单位为 cm^{-1}。

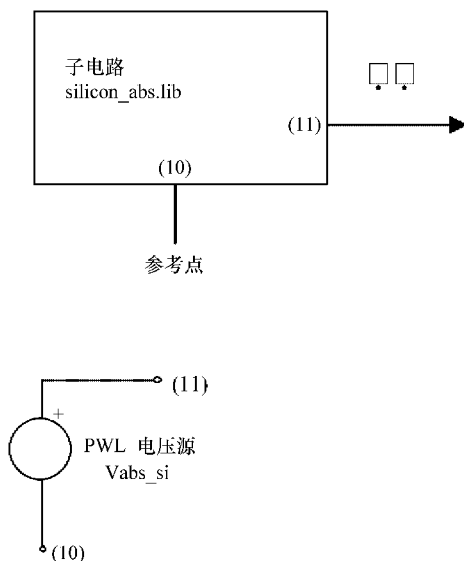


图 2-4　硅吸收系数子电路方块图以及内部电路的结构图

2.3.2　短路电流子电路模型

在附录 B 中，文件“jsc. lib”是 PSpice 短路电流模型，其中用电压控制的电压源（E－源）来实现式（2-2）、式（2-3）、式（2-4）和式（2-5）。对应的程序如下：

```
egeom0 230 200 value={1.6e-19*v(202)*v(203)*(1000/962.5)*v(201)*(1e16/19.8)*
+lp*(1-V(204))/(v(202)*lp+1)}
egeom1 231 200 value={cosh(we/lp)+se*(lp/dp)*sinh(we/lp)}
egeom2 232 200 value={se*(lp/dp)*cosh(we/lp)+sinh(we/lp)}
egeom3 233 200 value={(se*(lp/dp)+v(202)*lp-exp(-v(202)*we)*v(232))}
ejsce 205 200 value={v(230)/(v(202)*lp-1)*(-v(202)*lp*
+exp(-v(202)*we)+v(233)/v(231))};short circuit
```

为了增加其可读性，在文件中将式（2-2）分解为 4 个部分。E－源文件名为“ejsce”，返回发射区短路光谱电流密度。这意味着通过这个程序能够计算出所有

波长以及由 PWL 文件提供的吸收系数和光谱密度所对应的 $J_{scE\lambda}$ 的具体数值。为了易于算法收敛，将（$\alpha^2L_p^2-1$）项分解为（αL_p+1）（αL_p-1），第一个因式在“egeom3”中，第二个在“ejsce”中。

基区的处理方法类似。必须指出，在文件中光谱积分值——总辐射度为 962.5W/m^2，所以必须将光子通量按比例变换为 1000W/m^2 的 AM1.5G 光谱。因此，在描述发射区的“egeom0”和基区的“egeom33”的电源中含有 1000/9652.5 因子。在附录 B 中库文件名为“jsc.lib”的文件给出拓扑连接语句，图 2-5 给出了子电路外部节点的示意图。QE 和 SR 节点的含义在后面解释。

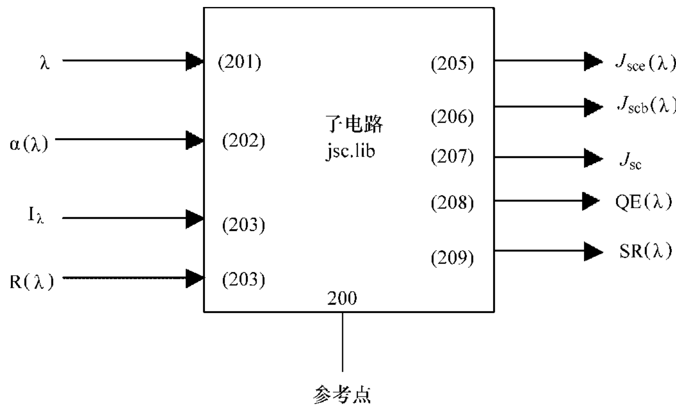


图 2-5 jsc. lib 子电路外部节点示意图

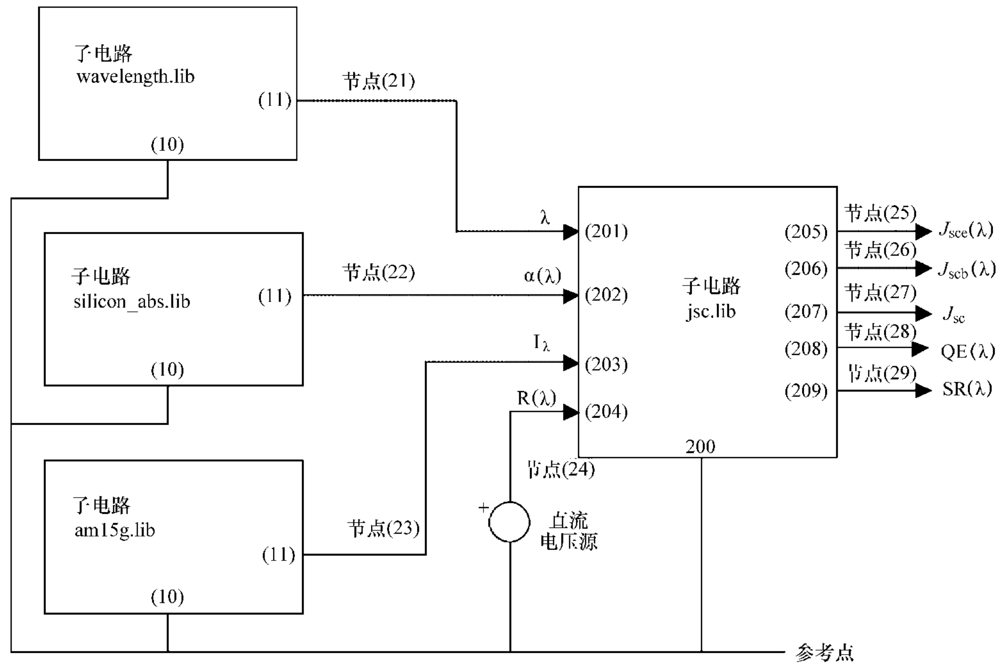


图 2-6 文件 jsc_ silicon. cir 的结构示意图

计算发射区和基区光谱电流密度完整的 PSpice 文件是以“. cir”为后缀的文件，包括了所需的子电路文件和瞬态分析显示程序。方框图 2-6 给出了这个文件的结构示意图。如图 2-6 所示，各子电路的内部节点编号是相同的，而整个电路又有一组新的节点编号。采用这种编号方式便于 PSpice 电路文件的编写。例如，在计算不同太阳能光谱或不同吸收系数对应的光谱电流密度时，只需使用新的子电路替代旧的子电路即可。下面图例给予说明。

例 2.1　基于下面晶体硅电池的给定数据，编写 PSpice 文件计算发射区和基区光谱短路电流密度。

已知：发射区厚度 $W_e=0.3\text{mm}$，基区厚度 $W_b=300\mu\text{m}$，$L_p=0.43\mu\text{m}$，$S_e=2\times10^5\text{cm/s}$，$D_p=3.4\text{cm}^2/\text{s}$，$L_n=162\mu\text{m}$，$S_b=1000\text{cm/s}$，$D_n=36.33\text{cm}^2/\text{s}$。

解　PSpice 文件如下：

```
* JSC_SILICON.CIR
.include silicon_abs.lib
.include am15g.lib
.include wavelength.lib
.include jsc.lib
****** circuit
xwavelength 21 0 wavelength
xabs 22 0 silicon_abs
xsun 23 0 am15g
xjsc 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 jsc params: we=0.3e-4 lp=0.43e-4 dp=3.4
+ se=20000 wb=300e-4 ln=162e-4 dn=36.63 sb=1000
vr 24 0 dc 0.1
****** analysis
.tran 0.1u 1.2u 0.3u 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end
```

可以看到，吸收系数，AM1.5G 光谱和波长文件使用了“. includ”调用库文件，子电路的连接方式如图 2-6 所示。

文件中“. tran”命令是瞬态分析命令，分析时间长度为 1.2μs。由 PWL 的定义可知，在 PSpice 内部，实际的物理含义是波长单位为 μm。所以 PSpice 的分析实质是对 0 ~ 1.2μm 波长范围的扫描。0.1V 的直流电压对应着 10% 的反射系数，即对于所有波长的光反射系数为 10%。仿真结果如图 2-7 所示。

将大气中 AM1.5G 标准太阳光谱的吸收带转换为电流响应与波长的关系曲线，如图 2-7 所示。由图可以看出，总电流主要是由基区分量决定的，而在短波范围内发射区的贡献较大。[译者注：V（25）和 V（26）分别表示发射区和基区产生的短路电流密度。]

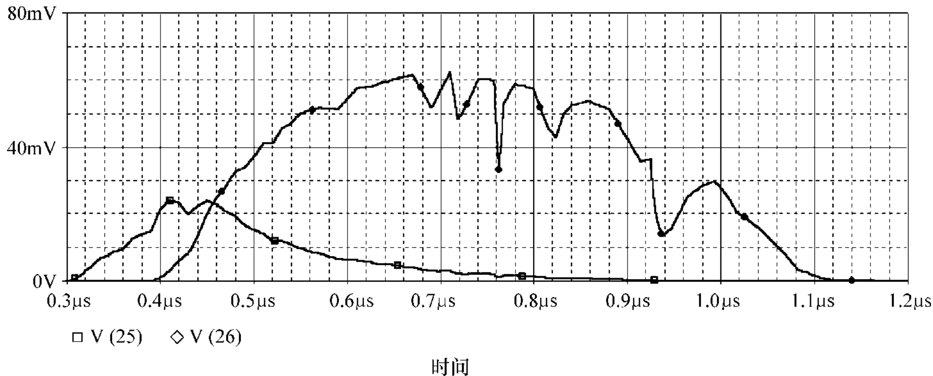


图 2-7　发射区光谱电流密度（方形）和基区光谱电流密度（菱形）

注：y 轴的单位为mA/cm^{2}μm，x 轴为波长，单位为 μm。

2.4　短路电流

2.3 节已经介绍了单色光的短路电流密度是波长的函数。当含有所有波长的太阳光照射在电池表面时，电池产生的总电流是短路光谱电流密度对所有波长的积分值，其公式如下：

$$J_{sc} = \int_0^{\infty} J_{sc\lambda} \mathrm{d}\lambda = \int_0^{\infty} (J_{scE\lambda} + J_{scB\lambda}) \mathrm{d}\lambda \tag{2-7}$$

式中，短路电流密度的单位为A/cm^2。由式（2-2）和式（2-3）可知，发射区和基区的光谱电流密度与给定波长的光子通量 ϕ_0 是线性关系。由式（2-4）可知，若光子通量与光照度是线性关系且光谱的分布是不变的，则短路电流与光照度是线性关系。由此得出一个重要的结果，太阳电池短路电流正比于光照度。尽管上述推理是基于一个简化模型，而当温度不变且不是聚焦式太阳电池时，这个结论在很宽的光照度范围内是有效的，对大多数太阳电池的设计人员有所帮助（译者注：这里对原文稍作修改，以便于读者理解）。

为了计算式（2-7）对波长的积分，PSpice 程序中调用了名称为“sdt(　)”的时间积分的函数。这里必须将时间转换为波长，即将对时间的积分转换为对波长的积分（因此要乘一个 10^6 的因子来调整单位）。下面通过例 2.2 进行图示说明。

例 2.2　使用例 2.1 中给出的晶体硅太阳电池的相关参数，计算短路电流密度。

解　根据例 2.1 给定的几何尺寸和参数，调用 PSpice 中的积分函数“sdt(　)”，在 PSpice 程序中增加下面一行：

```
ejsc 207 200 value={1e6*sdt(v(205)+v(206))}
```

其中，节点 V（207）返回太阳电池的总短路电流密度值为 31.811mA/cm^2。在波长 0.3～1.2μm 波长区间内积分结果如图 2-8 所示。

当然，我们关注的是总短路电流密度对所有光谱波长的积分值，即 1.2μm 对应的数值。

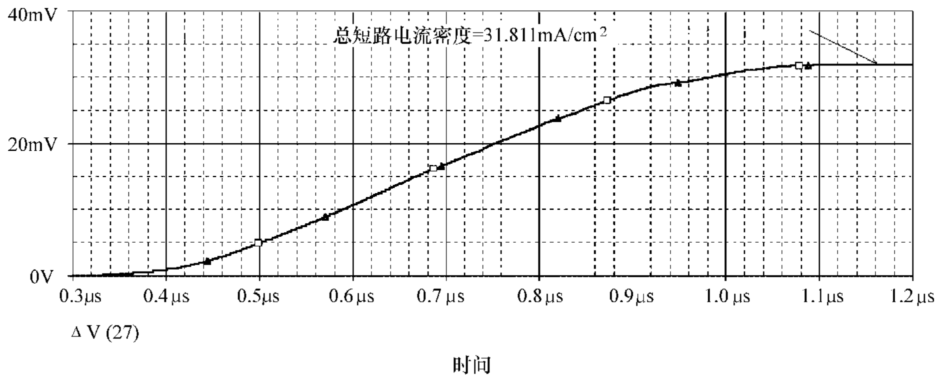


图 2-8　图 2-7 所示的光谱短路电流密度对波长的积分

注：x 轴表示波长，单位为 μm；y 轴是短路电流密度光谱特性对波长从 0～λ 的积分值（单位为mA/cm^2）。在 1.2μm 处给出总光谱的短路电流密度。

提示：在 E－源 ejsc 的积分值需要乘一个 1×10^6 的变换系数，其原因是 PSpice 对时间积分，单位为 s，而这里是对波长的积分，单位 μm。

2.5　量化效率

量化效率（QE）是太阳电池的一个重要物理量，其定义为：入射光谱的每个光子在太阳电池外部电路中产生的电子数。有两种不同的量化效率定义：即内部的和外部的。内量化效率不包括反射的光照度，而外量化效率是全部的光谱密度。

$$\mathrm{IQE} = \frac{J_{\mathrm{sc}\lambda}}{q\phi_0(1-R)} \tag{2-8}$$

$$\mathrm{EQE} = \frac{J_{\mathrm{sc}\lambda}}{q\phi_0} \tag{2-9}$$

译者注：式（2-8）和式（2-9）分别是内量化效率和外量化效率的定义式。

因为短路光谱电流密度含有基区和发射区两个分量，所以量化效率也含有两个分量。量化效率是一个无量纲的物理量，通常用百分比表示。

例 2.3　用例 2.1 给出的太阳电池参数计算总的内量化效率 IQE。

解　在 PSpice 程序的受控 E－源，名称为“eqee”和“equeb”返回内量化效率的值：

```
eqee 234 200 value={v(205)*19.8/(q*v(203)*(1000/962.5)* (1-V(204))*v(201)*1e16)}
eqeb 244 200 value {v(206)*19.8/(q*v(203)*(1000/962.5)*(1-v(204))*v(201)*1e16)}
```

在上面程序中，V（205）和 V（206）返回的数据，是将 AM1.5 光谱归一化到 1000W/m^{2}后得到的光谱短路电流密度。因此，在 E－源中用 1000/962.5 归一化因子，将式（2-8）和式（2-9）分母的数值归一化为 1000W/m^2。

图 2-9 为总量化效率特性曲线，也就是用百分比表示的 V（28）的量化效率与波长的特性曲线。纵坐标为量化效率，用百分比表示，横坐标为波长。

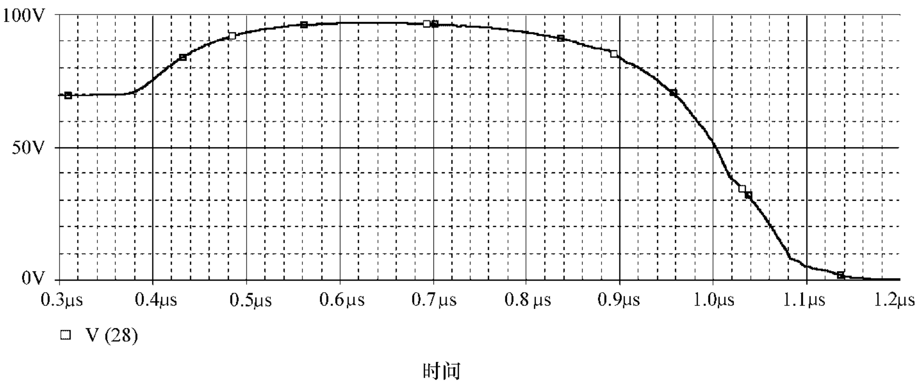


图 2-9　例 2.1 中描述的太阳电池的总内部量化效率的特性曲线

注：x 轴为波长，y 轴为百分比。

通过例 2.3 可以看出，当波长为 0.7μm 时，内部量化效率达到了最大值，其值约为 95%，而在波长两端点移动时，内部量化效率逐渐衰减。因此，太阳电池的几何形状和设计对 QE 的形状和数值均有重要的影响，而且对于所有波长，IQE 的数值越大，太阳电池越理想，其最大 IQE 值为 100%。

PSpice 仿真结果和 PC1D 的数学分析及模拟的结果接近。误差来自所使用的方程没有考虑到许多太阳电池工作的特性，只考虑到数值处理的特性。因此，PSpice 的仿真结果只是一阶近似的结果。

2.6　光谱响应

太阳电池的光谱响应（SR）定义为短路光谱电流密度与光谱密度的比值。由式（2-3）可得：

$$\mathrm{ISR}=\frac{J_{\mathrm{sc}\lambda}}{I_{\lambda}(1-R)} \tag{2-10}$$

$$\mathrm{ESR}=\frac{J_{\mathrm{sc}\lambda}}{I_{\lambda}} \tag{2-11}$$

式中的单位是 A/W，可以很容易地由式（2-2）、式（2-3）、式（2-6）和式（2-10）、式（2-11）得到光谱响应和量化效率的关系：

$$\mathrm{ISR} = 0.808 \cdot (\mathrm{IQE}) \cdot \lambda \tag{2-12}$$

$$\mathrm{ESR} = 0.808 \cdot (\mathrm{EQE}) \cdot \lambda \tag{2-13}$$

当波长的单位为 μm 时，用式（2-12）和式（2-13）可以求出光谱响应，其单位为 A/W。

例 2.4　计算例 2.1 中电池的内部光谱响应。

解　当使用式（2-12）计算内光谱响应时，加到网表里的 PSpice 对应语句为

esr 209 200 value = {(v(234) + v(244)) * 0.808 * v(201)}

V（209）返回光谱响应的数据，其结果如图 2-10 所示。

由图 2-10 可知，在 0.9μm 波长附近按照 A/W 计算得到的灵敏度最大。

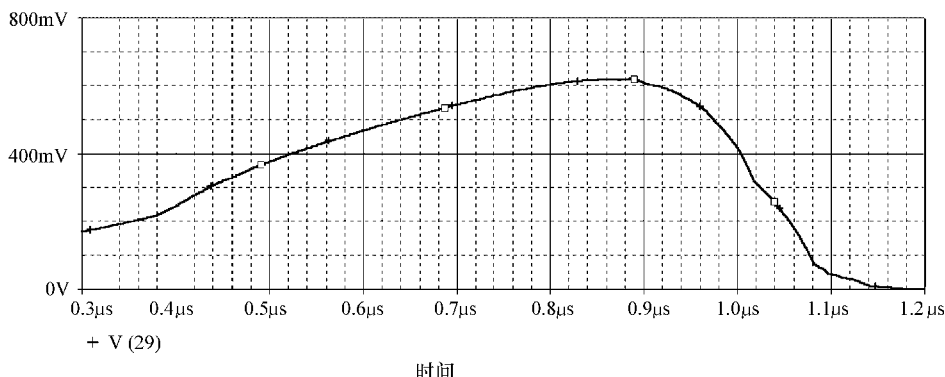


图 2-10　光谱响应

注：x 轴是波长，单位为 μm；y 轴是 SR，单位为 mA/W。

2.7　暗电流密度

PV 装置是一个光电转换装置。因为在短路工况，太阳电池的输出功率等于零，所以上一节所使用的短路条件不是太阳电池的实际工作条件。第 3 章将介绍太阳电池工作点的变化范围以及输出电流 – 电压的特性曲线，使用这个曲线可以计算出太阳电池为负载提供的功率。太阳电池的输出特性曲线类似于光电二极管的伏安特性曲线，描述其特性的解析公式需要暗电流 – 电压曲线模型，也就是无光照的模型。

基于前面的假设，暗电流电流 – 电压曲线完全类似于传统二极管的特性。产生电流 – 电压曲线有发射区和基区两个部分，即类似于上一节计算短路电流密度的情况。有兴趣的读者可以阅读附录 J 中的推导过程。考虑两个太阳电池区域：基区和发射区半导体均匀掺杂，这两部分电流可表示为：

$$J_{\text{darkE}}=q\frac{n_i^2 D_{\text{p}}}{N_{\text{Deff}}L_{\text{p}}}\left[\frac{S_{\text{e}}\frac{L_{\text{p}}}{D_{\text{p}}}Ch\frac{W_{\text{e}}}{L_{\text{p}}}+Sh\frac{W_{\text{e}}}{L_{\text{p}}}}{S_{\text{e}}\frac{L_{\text{p}}}{D_{\text{p}}}Sh\frac{W_{\text{e}}}{L_{\text{p}}}+Ch\frac{W_{\text{e}}}{L_{\text{p}}}}\right]\left[\mathrm{e}^{\frac{V}{V_{\text{T}}}}-1\right] \tag{2-14}$$

以及

$$J_{\text{darkB}}=q\frac{n_i^2 D_{\text{n}}}{N_{\text{Aeff}}L_{\text{n}}}\left[\frac{S_{\text{b}}\frac{L_{\text{n}}}{D_{\text{n}}}Ch\frac{W_{\text{b}}}{L_{\text{n}}}+Sh\frac{W_{\text{b}}}{L_{\text{n}}}}{S_{\text{b}}\frac{L_{\text{n}}}{D_{\text{n}}}Sh\frac{W_{\text{b}}}{L_{\text{n}}}+Ch\frac{W_{\text{b}}}{L_{\text{n}}}}\right]\left[\mathrm{e}^{\frac{V}{V_{\text{T}}}}-1\right] \tag{2-15}$$

总电流－电压曲线等于发射区和基区两个分量之和：

$$J_{\text{dark}}=J_{\text{dark E}}+J_{\text{dark B}}=J_0\left[\mathrm{e}^{\frac{V}{V_{\text{T}}}}-1\right] \tag{2-16}$$

式中，J_0 是饱和电流密度。图 2-11 给出了式（2-16）表示的太阳电池暗电流特性的符号以及暗电流和电压的方向。

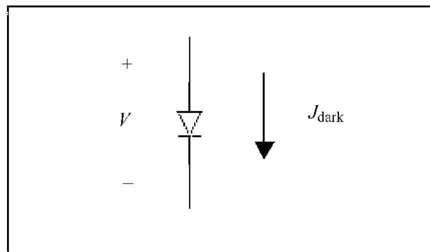


图 2-11　暗电流的符号及方向

饱和电流密度是发射区和基区饱和电流密度分量的和。

可以看到，暗饱和电流密度与光照参数无关，而取决于几何参数或传输半导体的参数。其中本征半导体载流子浓度 n_i 是一个重要的参数，其值取决于半导体的导带和价带的状态密度以及带隙。在研究光电响应时，不同数值的 n_i 会产生巨大的差异。在式（2-14）和式（2-15）中，暗电流密度是本征浓度的二次方（译者注：这一句话是译者增加）。注意，暗饱和电流密度取决于本征浓度的二次方，在不同半导体中 J_0 值的差别会有几个数量级大小。必须指出，由于带隙变窄效应，高掺杂效应改变了有效本征载流子的浓度值。这很容易通过将掺杂浓度值用有效的掺杂浓度值替代来模拟，如在附录 J 所述。

2.8　太阳电池的材料

到此为止，已经介绍的影响半导体光电转换效率的重要参数有吸收系数、反射系数、本征载流子的浓度、迁移率和寿命。也许本征载流子的浓度是一个至关重要的参数，其差异会对太阳电池的 PV 效应产生重要的影响。

我们对两类太阳电池的主要参数进行了归纳比较并列于表 2-2。第一类是在例 2.1～例 2.3 中介绍的硅基太阳电池，第二类则是砷化镓太阳电池，其参数来自参考文献［2.2］。

表 2-2 列出了使用式（2-2）和式（2-3）解析模型计算出的短路电流密度 J_{sc} 和 J_0 数值和使用式（2-14）和式（2-15）计算出的暗电流。硅材料的带隙窄化和

迁移率的计算模型参见附录 J。

由表可看出两类电池的暗电流密度存在着巨大的差异，砷化镓电池暗饱和密度电流 J_0 比硅电池的大约低 8 个数量级。其原因主要是两个材料 n_i^2 相差接近 8 个数量级，硅的 $n_i^2 = 1 \times 10^{20}$，而砷化镓的值为 8.6×10^{11}。

短路电流密度 J_{sc} 的差异很小。即使采用复杂的仿真模型计算，二者的差异不会超过一个数量级。由此得到的如下结论：制造太阳电池的半导体材料对其电气特性、几何结构以及技术等有着重要影响。

表 2-2　硅和砷化镓太阳电池的比较

参数	硅基太阳电池*	砷化镓型电池**
n_i/cm^{-3}	1×10^{10}	9.27×10^5
$W_e/\mu m$	0.3	0.2
$L_p/\mu m$	0.43	0.432
$S_e/(\mathrm{cm/s})$	2×10^5	5×10^3
$D_p/(\mathrm{cm}^2/\mathrm{V})$	3.4	7.67
$W_b/\mu m$	300	3.8
$L_n/\mu m$	162	1.51
$S_b/(\mathrm{cm/s})$	1×10^3	5×10^3
$D_n/(\mathrm{cm}^2/\mathrm{V})$	36.63	46.8
$J_0/(\mathrm{A/cm}^2)$	1×10^{-12}	9.5×10^{-20}
$J_{sc}/(\mathrm{A/cm}^2)$	31.188×10^{-3}	25.53×10^{-3}

* 几何参数摘自 PC1D5 文件 Pvcell. prm，使用附录 B 中的方程计算。

** 摘自 L. D. Partain，*Solar Cells and their application*，Wiley 1995 p，16[2.2]。

2.9　电流密度的叠加

当暗电流和光照特性分别计算得出后，一个简单的方法，在某些情况下尽管它可能不准确，即假定这两种特性满足叠加原理，可以使用叠加方法计算出总电流密度。暗电流由式（2-15）求得，而光照特性由式（2-7）获取，二者叠加得到：

$$J = J_{sc} - J_{dark} \tag{2-17}$$

需要指出，暗电流和光照部分有相反的符号。附录 J 中的推导过程以及图 2-3 和图 2-9 中的符号规定都清楚地说明这一点。

将暗电流的式（2-16）代入式（2-17），得

$$J = J_{sc} - J_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \tag{2-18}$$

必须指出，到此为止，书中的符号约定是光电转换约定：即规定由 PV 转换的短路电流定义为正向，这种符号约定更符合实际情况。

2.10 DC 扫描图和太阳电池的伏安特性

如果在 PSpice 文件中用方程（2-18）绘制伏安特性曲线，只需使用直流（DC）电流源和二极管组成一个简单电路。下面介绍两个元件的 PSpice 语句。

直流电流源的语句

iname node + node – DC value

其中，第一个字母“i”是电流源的标志，根据习惯约定电流的方向是从外电路流向 node + 节点。

二极管的语句

Dname anode cathode model_name

其中，anode 是二极管阳极；cathode 是二极管的阴极；model_name 是二极管模型的名称。默认模型的名称为 d，含有许多内部模型参数，其中之一是饱和电流（注：这里是指饱和电流而非饱和电流密度）。模型的命令用“点”命令：

.model model_name spice_model

更进一步讲，因为我们希望看到电池电流与电压之间的数值关系，所以需要进行直流扫描分析而不是瞬态分析。使用 PSpice 中的直流分析程序实现这个功能。

直流分析的语句

.dc voltage_ source start_ value end_ value step

其中，voltage_source 是电压源名字；start_value 是起始电压值；end_value 是终止电压值；step 是步长的增量。

例 2.5 试编写一个 PSpice 程序，用式（2-18）和表 2-2 中 J_{sc} 和 J_0 参数仿真硅基太阳电池单位面积（$1cm^2$）上的伏安特性曲线。

解

```
******* solar cell characteristics
*cel_1_si.cir
isc 0 1 31.188e-3
dcell 1 0 diode
.model diode d(is=1e-12)
vbias 1 0 dc 0
.dc vbias 0 0.7 0.01
.probe
.end
```

图 2-12 绘制了伏安特性曲线。由程序可知，式（2-18）中指数项的饱和电流是 $1\times10^{-12}A/cm^2$，而短路电流是名为“isc”的电流源，其数值为 31.188mA。

例 2.6 试编写一个 PSpice 程序，用式（2-18）和表 2-2 中的参数对砷化镓型太阳电池单位面积（$1cm^2$）的伏安特性进行仿真。

解 砷化镓的 PSpice 模型与硅型电池的模型形式相同，其差别为 J_0 和 J_{sc} 的取

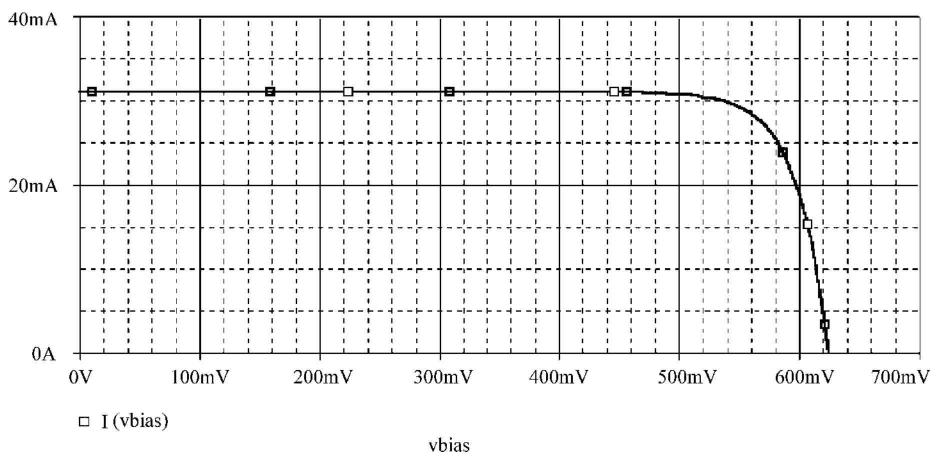


图 2-12　使用式（2-18）及表 2-2 所示数据计算出的硅基太阳电池的伏安特性

注：vbias 为偏置电压。

值。在计算砷化镓电池时使用表 2-24 的值（$J_{sc}=25.53\times10^{-3}\mathrm{A/cm^2}$，$J_0=9.5\times10^{-20}\mathrm{A/cm^2}$）。

```
******cell_1_gaas
******* solar cell characteristics
isc 0 1 25.53e-3
dcell 1 0 diode
.model diode d(is=9.5e-20)
vbias 1 0 dc 0
.dc vbias 0 1.2 0.01
.probe
.end
```

仿真的结果如图 2-13 所示。

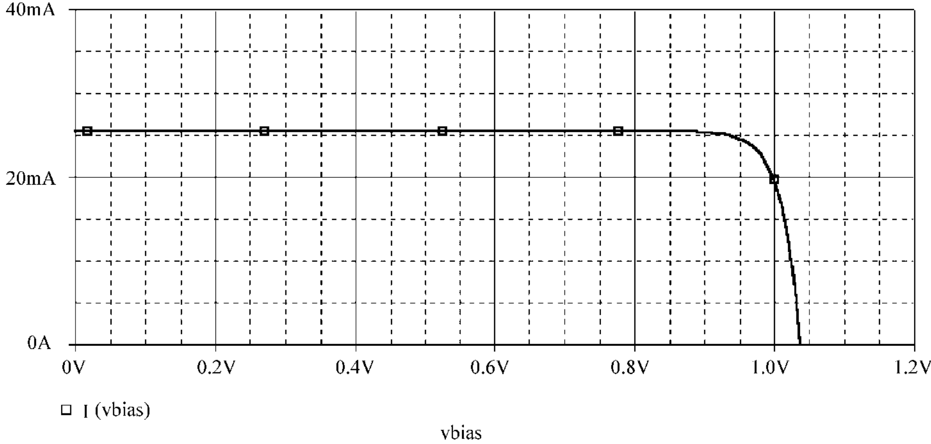


图 2-13　使用式（2-18）及表 2-2 所示数据仿真砷化镓太阳电池的伏安特性

比较图 2-12 和图 2-13 所示的仿真结果，可以看出不同材质的太阳电池产生出不同的电压和电流。尤其在下面情况下电压的差别特别重要：砷化镓太阳电池的最大电压几乎是硅太阳电池的两倍，其原因是两种材料的 n_i^2 存在很大的差异，导致了 J_0 具有很大的差异。由此引出一个结论，PV 电池电气特性差异的根源是不同半导体材料基础参数值的差异所致。

2.11 非理想电路模型：串并和分流电阻及其组合项

至此，由于很多的简化假设，使得上述的解析模型不能解释或模拟器件的一些重要特性，如电流的 2D 效应、详细的表面复合模型、光的吸附、背表面反射、背表面电场等。

此外，为了生产出性价比合理的工业产品，制造实际太阳电池和模块工艺中不仅需要许多设计折衷而且需要技术折衷。制造的重复性和可靠性是一批产品平均特性的统计值。在正确仿真 PV 系统时，通常使用含有阻性损耗的简化太阳电池模型。产生电阻损耗两个主要原因如下：

1）串联电阻。串联电阻描述了半导体的电阻特性、在发射层中 2D 导电的机理和接触电阻等。

2）并联电阻。并联电阻描述了因部分 pn 结的短路现象所致跨越于耗尽区的所有并联损耗。

大多数情况，简单认为串联和并联电阻是定值电阻不足为太阳电池进行准确的建模。其原因基于如下多个物理现象：

1）非理想的二极管。这意味着实测的暗电流伏安特性曲线不能与式（2-18）中所描述暗电流特性准确的一致。在式（2-18）中指数幂的分母需要引入非单位“二极管因子”n。

2）在 pn 结的空间电荷区存在着复合电流。在式（2-18）中，通常令二极管因子等于 2 来描述复合电流。

3）在非晶硅太阳电池中，采用 p－i－n 结构，在本征层中，复合电流不是指数函数，其电压和电流的是非线性函数。

在第 3 章将考虑非理想的串联电阻和分流电阻的影响。

2.12 习题

2.1 试比较一个太阳电池量化效率，其参数如下：其一，电池具有任意长度的基区层（假定长度为 2mm）；其二，同样材质的电池具有基区的厚度为 170μm 以及基区表面复合速率为 10000cm/s，其余参数值与例 2.1 相同。

2.2 与例 2.1 基区层具有相同的参数值，调节发射区的厚度使得发射区在

500nm 处的量化效率为 50% 。

参 考 文 献

[2.1] Green, M.A., *Silicon solar cells*, Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, Sydney, 1995.
[2.2] Partain, L.D., *Solar Cells and their Applications*, Wiley, 1995.
[2.3] Green, M.A., *Solar Cells*, University of New South Wales, Sydney,1992.
[2.4] Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.T., *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press, 1983.
[2.5] Van Overtraeten, R. and Mertens, R., *Physics, Technology and Use of Photovoltaics*, Adam Hilger, 1986.
[2.6] PC1D Photovoltaics Special Research Centre at the University of New South Wales, Sydney, Australia.

第 3 章　太阳电池的电气特性

摘要：本章主要介绍太阳电池的基本公式，并解析描述太阳电池在暗区和光照时的伏安特性。本章开始，介绍最简单的太阳电池的 PSpice 模型，它由一个二极管和一个电流源组成，还定义了太阳电池的基本电气参数：短路电流 I_{sc}，开路电压 V_{oc}，最大功率 P_{max}和填充因子 FF。在此基础上，考虑串、并联电阻损耗和复合损耗以及温度和空间辐射对太阳电池特性的影响，又对其 PSpice 模型进行了一些修正。这样，就建立了一个可以对任意时刻的光照强度和温度等参数进行模拟的太阳电池的行为模型。

3.1　理想等效电路

如第 2 章所述，一个太阳电池可以被看作一个一阶模型，其特性可用工作电压和光照这两个激励的响应叠加来描述。首先，从控制太阳电池电流的简化式(2-16)入手研究：

$$J = J_{sc} - J_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{3-1}$$

它给出了太阳电池的电流密度受给定的光照强度和工作电压的影响。由太阳电池所产生的电流值，如下式所示：

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{3-2}$$

式中，I_{sc}（短路电流）和 I_0（暗电流）跟它们各自的电流密度 J_{sc}和 J_0 有关，关系如下：

$$I_{sc} = AJ_{sc} \tag{3-3}$$

$$I_0 = AJ_0 \tag{3-4}$$

式中，A 是太阳能装置的总面积，金属覆盖的面积可忽略不计。

由上式可知，短路电流和暗电流的大小都与太阳电池的面积呈线性关系。这是一个重要的结论，有助于根据不同实际应用的需求，按照比例增大或减小 PV 系统的规模。

这是太阳电池最简单的模型，也是在太阳 PV 发电及其应用中使用最为广泛的模型。在 PSpice 仿真中能很容易地用电流值为 I_{sc}的电流源和一个二极管来对它进行建模。

虽然电流 I_0 受温度影响很大，但是最初认为它是一个定值。温度的影响将在本章后面部分进行讲解。

3.2　理想太阳电池的 PSpice 模型

综上所述，处理 PSpice 电路的方法之一是定义主模块的子电路。对于太阳电池也是一样。本文后面将介绍使用子电路来简化对几个太阳电池的串联或并联的处理。

一个理想太阳电池等效子电路的 PSpice 模型如图 3-1a 所示，该图是式（3-2）的电路表达。PV 发电的情况是这样的：当给定的光照强度照射到太阳电池表面时，其短路电流值与光照强度成正比。在 PSpice 中为了实现这点，短路电流用一个 G－源——压控电流源来描述，G－源与 E－源有类似的语法：

g_name　node +　node −　control_node +　control_node − gain

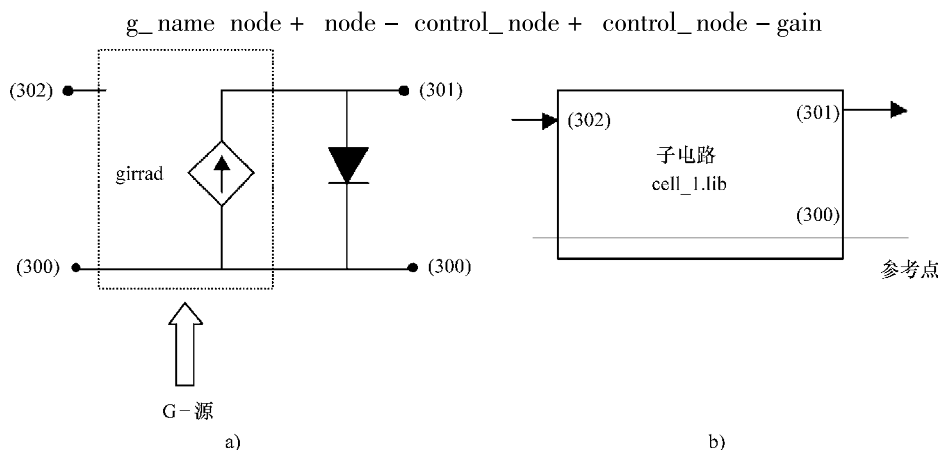


图 3-1　a）cell_1. lib 太阳电池等效电路；b）框图

可见，这是一个介于正节点“node +”和负节点“node −”之间的电流源，它的值是由正节点与负节点之间的电压与增益的乘积来决定的。

给该装置的参数赋值，可简化为下面的数学表达式：

g_name　node + node − value =　{expression}

在应用实例中，将 G－源命名为“girrad”并给出下式：

$$\text{girrad} = \frac{J_{sc}A}{1000}G \tag{3-5}$$

式中，G 是光照强度值，单位为 W/m^2，J_{sc}是在标准状态下（AM1.5G，$1000W/m^2$ $T_{cell}=25℃$）给定的，这也是常用的测量条件。太阳电池生产商的使用手册已给出了相应的短路电流的标准值。假定光照强度和短路电流的比例关系成立，则由式（3-5）可得出在任意光照强度 G 条件下的短路电流值。这时通常认为满足弱光照条件。

该模型的子电路网表如下：

```
.subckt cell_1 300 301 302 params: area=1, j0=1, jsc=1

girrad 300 301 value={(jsc/1000)*v(302)*area}
d1 301 300 diode
.model diode d(is={j0*area})
.ends cell_1
```

由此可见，在子电路定义中给出了参数的虚拟值，即归一化的值，而实际值将在后面将子电路建立的模块连接到电路时进行说明。这个二极管模型中定义了一个 PSpice 二极管模型的参数“is”，它是饱和电流密度 J_0 与电池面积 A 的乘积，其框图如图 3-1b 所示。由图可知，节点（300）为参考节点，在输入节点（302）输入一个电压值作为光照强度，还有一个太阳电池连接电路的输出节点（301）。

将太阳电池的子电路连接在一个测量电路中，从而获得它的伏安特性，如图 3-2 所示。该电池的面积等价于一个直径为 5cm 的 PV 器件。作为一个例子在以下的 PSpice 文件中，将短路电流密度 J_{sc} 设定为 34.3mA/cm^2，$J_0=1\times10^{-11}$A/cm^2。

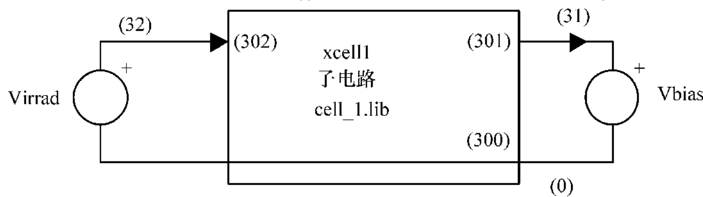


图 3-2　太阳电池伏安特性测量电路

```
*cell_1.cir
.include cell_1.lib
xcell1 0 31 32 cell_1 params:area=126.6  j0=1e-11  jsc=0.0343
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000

.plot dc i(vbias)
.probe
.dc vbias -0.1 0.6 0.01
.end
```

由上述文件可知，该电路中直流电压源的偏置电压 vbias 从 −0.1V 扫描到 +0.6V。上面的仿真结果如图 3-3 所示，曲线与 y 轴的交点为该电池的短路电流

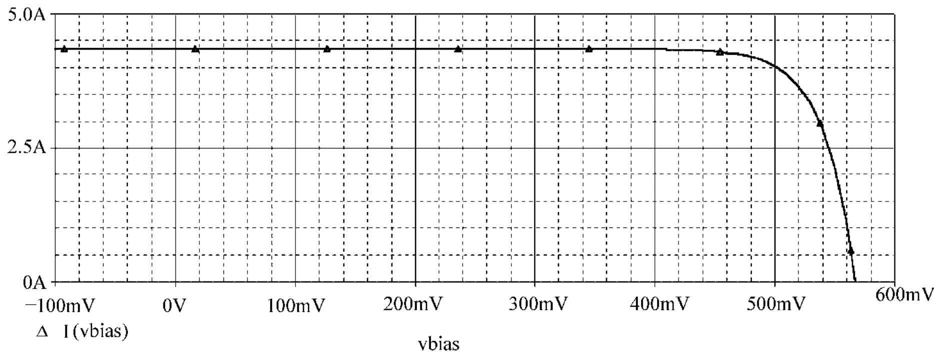


图 3-3　图 3-2 中太阳电池模型的伏安特性曲线

4.342A，即 0.0343 ×126.6A =4.342A。从伏安特性曲线中可获得的其他关键点将在下面的章节中讲述。

3.3　开路电压

除了短路电流以外，太阳电池特性的另外一个重要工作点是图 3-3 中伏安特性曲线与电压轴的交点。它被定义为开路工作点，与之对应的电压值称为开路电压 V_{oc}。

在开路条件下，$I=0$，代入式（3-2）可得：

$$I=0=I_{sc}-I_0\left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}}-1\right) \tag{3-6}$$

得到开路电压：

$$V_{oc}=V_T\ln\left(1+\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \tag{3-7}$$

由式（3-7）可知，开路电压值与 I_{sc}/I_0 的对数成正比。这意味着在恒温状态下，开路电压与短路电流值的对数成比例关系，而短路电流又与光照强度呈线性比例关系，这就导致了开路电压和光照强度也成对数关系。从而得出一个重要的结论：光照强度的大小对短路电流的影响要远远大于其对开路电压的影响。

将式（3-3）与式（3-4）代入到式（3-7）中得：

$$V_{oc}=V_T\ln\left(1+\frac{J_{sc}}{J_0}\right) \tag{3-8}$$

由式（3-8）表明，开路电压的值与电池的面积无关。在相同的光照强度和温度条件下，无论电池面积多大，开路电压都是相同的，这个结论相当重要。

例 3.1　已知一个直径为 6in 的圆形太阳电池，假设 $J_{sc}=34.3\text{A/cm}^2$，$J_0=1\times10^{-11}\text{A/cm}^2$，绘制在不同光照强度 $G=200\text{W/m}^2$、400W/m^2、600W/m^2、800W/m^2、1000W/m^2 条件下的伏安特性曲线，并计算相应的开路电压值。

在这种情况下网表中必须包含一个指令，这个指令用来给出不同光照强度，可用如下指令实现：

```
*IRRADIANCE.CIR
.include cell_1.lib
xcell1 0 31 32 cell_1 params:area=126.6  j0=1e-11  jsc=0.0343
vbias 31 0 dc 0
.param IR=1
virrad 32 0 dc {IR}
.step param IR list 200 400 600 800 1000
.plot dc i(vbias)
.probe
.dc vbias -0.1 0.6 0.01
.end
```

从上面的网表中可以看出，定义了一个新的参数“IR”，它用于给电压源 virrad 赋值。表中的“. step param”是一个点命令，它能够使 PSpice 重复地对电路在列表中的每个光照强度值进行仿真。

这样就得出了图 3-4 中的图形，并且使用 probe 指针工具可测量出 V_{oc} 和 I_{sc} 的各值，结果见表 3-1。

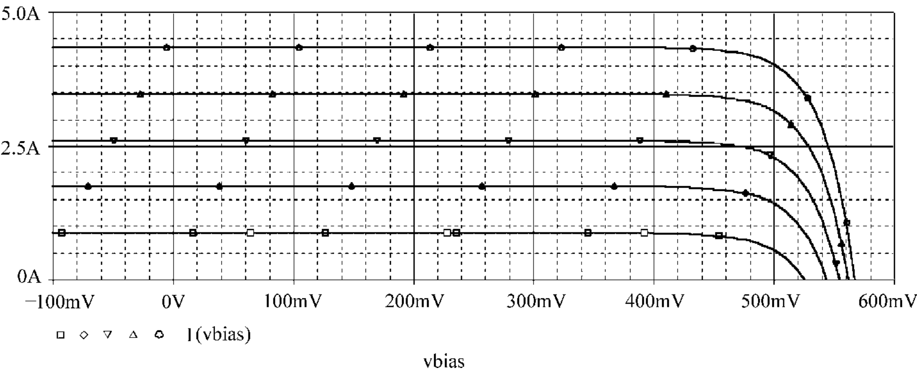


图 3-4 分别绘制在 200W/m² 、400W/m² 、600W/m² 、800W/m² 和 1000W/m² 光照条件下太阳电池的伏安特性曲线

表 3-1 在不同光照强度下的短路电流和开路电压

光照强度/(W/m²)	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 I_{oc}/V
1000	4. 34	0. 567
800	3. 47	0. 561
600	2. 60	0. 554
400	1. 73	0. 543
200	0. 86	0. 525

3. 4 最大功率点

太阳电池的输出功率等于流过负载的输出电流与电池电压的乘积。通常认为，正功率表示传递到负载的功率，负功率表示太阳电池自身消耗的功率。根据对符号的定义，图 3-1 中的伏安特性曲线上任一点的功率可表示为：

$$P = V \times I = V[I_L - I_0(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)] \tag{3-9}$$

显然，短路点的电压为零，因此短路点的功率为零；同理，开路时电流为零，功率也为零。在这两点之间，太阳电池产生正功率。显然有一个点输出的功率最大，故称之为最大功率点（MPP），定义其坐标为 $V = V_m$，$I = I_m$。在最大功率点的功率对电压的导数为零。

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V}=0=I_L-I_0\left(e^{\frac{V_m}{V_T}}-1\right)-\frac{V_m}{V_T}I_0e^{\frac{V_m}{V_T}} \tag{3-10}$$

由此可推断出 V_m 与 I_m 的关系，在最大功率点时：

$$I_m=I_L-I_0\left(e^{\frac{V_m}{V_T}}-1\right) \tag{3-11}$$

于是得出：

$$V_m=V_{oc}-V_T\ln\left(1+\frac{V_m}{V_T}\right) \tag{3-12}$$

这是一个超越方程，如果已知 V_{oc}（开路电压），就可以用式（3-12）计算出 V_m（最大功率点处电压）。

利用 PSpice 作出 $V\times I$ 对所加电压的函数图可以很容易得到最大功率点的坐标。不需要编写一个新 PSpice“. cir”文件，只需作出上述函数图。例 3.1 用此法所得的解答如图 3-5 所示。

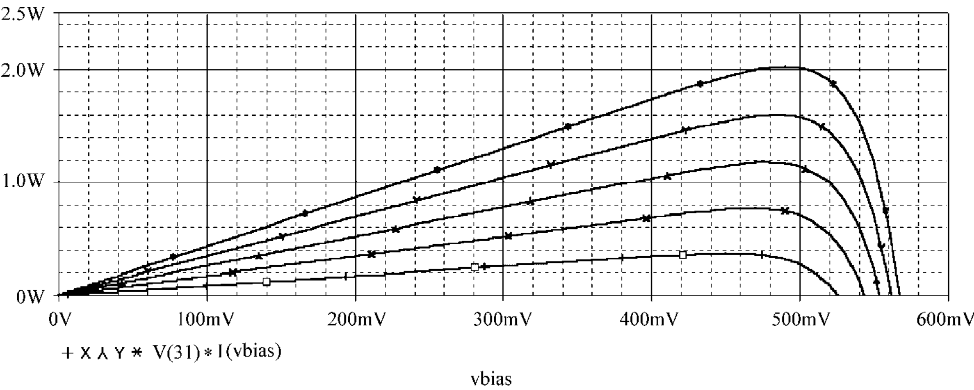


图 3-5　在 200W/m²、400W/m²、600W/m²、800W/m² 和 1000W/m² 几个不同的光照强度下，太阳电池电流与电压乘积（功率）的图形

表 3-2 列出了由式（3-12）计算得出的 V_m 的值和通过 PSpice 仿真得出的值，并对二者进行比较。由表可知，PSpice 仿真结果的精确度与我们所使用的电压步长，即 0.01V 有关。如果想要更高的精确度，则应使用更短的步长。

表 3-2　几种不同光照强度下的 PSpice 仿真结果

光照强度 /（W/m²）	PSpice 仿真得出的 V_m /V	用计算公式得出的 V_m（3-14）/V	PSpice 仿真得出的 I_m /A	PSpice 仿真得出的 P_{max} /W
1000	0.495	0.4895	4.007	2.01
800	0.485	0.4825	3.28	1.59
600	0.477	0.476	2.47	1.18
400	0.471	0.466	1.63	0.769
200	0.45	0.4485	0.820	0.37

下面概括介绍参考文献［3.11］中给出的用来计算电压 V_m 的其他模型。

替代模型 1：

$$V_m = V_{oc} - 3V_T \tag{3-13}$$

替代模型 2：

$$\frac{V_m}{V_{oc}} = 1 - \left(\frac{1+\ln\beta}{2+\ln\beta}\right)\frac{\ln(1+\ln\beta)}{\ln\beta} \tag{3-14}$$

其中：

$$\beta = \frac{I_{sc}}{I_0} \tag{3-15}$$

3.5 填充因子和能量转换效率

将最大功率 P_{max} 与 $I_{sc}V_{oc}$ 乘积之比定义为填充因子：

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{3-16}$$

填充因子是没有单位的，它表示太阳电池最大输出功率与 $I_{sc}V_{oc}$ 乘积的差距。

填充因子也可以由下面的经验公式近似表示：

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \tag{3-17}$$

下标 0 表示无电阻效应的理想太阳电池的填充因子，用以区别于其他任何带有损耗电阻的太阳电池的填充因子，将在下面的章节介绍。参数 v_{oc} 是开路电压 V_{oc} 对热电压 V_T 的归一化值：

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T} \tag{3-18}$$

式（3-17）给出的 v_{oc} 有合理的精度，大于 10。

例 3.2 在例 3.1 中，使用 PSpice 仿真获得了在几个不同光照条件下填充因子的值。

从表 3-1 中选取 I_{sc}，V_{oc} 的值，在表 3-2 中选取 V_m 和 I_m 的值，很容易计算得出填充因子的值，见表 3-3。

从表中可以看出，当光照强度在大范围变化时，填充因子的值几乎保持不变，大约为 0.8。

表 3-3 例 3.1 中填充因子的值

光照强度/(W/m^2)	填充因子
1000	0.816
800	0.816
600	0.819
400	0.818
200	0.819

能量转换率 η 被定义为太阳电池的输出功率与照射到太阳电池表面的能量 P_{in} 之比，而输入功率 P_{in} 为太阳电池面积与光照强度值的乘积：

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = FF\frac{V_{oc}I_{sc}}{P_{in}} = FF\frac{V_{oc}I_{sc}}{G \times Area} = FF\frac{V_{oc}J_{sc}}{G} \tag{3-19}$$

可以看出，对于一个给定的光照强度 G，太阳电池能量转换率的值与短路电流密度、开路电压和填充因子这三个主要的 PV 参数成正比。一般情况下，效率以百分比的形式给出。

在上面的例 3.2 中，能量转换率值由表 3-2 和表 3-3 给出的值计算得出，见表 3-4。

表 3-4　例 3.1 中能量转换率

光照强度/(W/m^2)	能量转换率（%）
1000	15.8
800	15.68
600	15.53
400	15.17
200	14.6

从表 3-4 中可以看出，太阳电池的能量转换率随着光照强度的增加而增加，这可以清楚地用式（3-19）表达。式中光照强度可以用“比例因子 S”按标准条件（1 个太阳，即 AM1.51000W/m^2）来换算，其公式如下：

$$G = SG_1 \tag{3-20}$$

已知 $G_1 = 1000W/m^2$，此时的能量转换率可表示为：

$$\eta = FF\frac{V_{oc}I_{sc}}{SG_1 \times Area} \tag{3-21}$$

如果光照强度与短路电流之间的比例已知：

$$\begin{aligned} I_{sc} &= SI_{sc1} \\ V_{oc} &= V_T\ln\left(1+\frac{SI_{sc1}}{I_0}\right) \approx V_T\ln\left(\frac{SI_{sc1}}{I_0}\right) = V_T\ln\left(\frac{I_{sc1}}{I_0}\right) + V_T\ln S \end{aligned} \tag{3-22}$$

最终可得：

$$\eta = FF\frac{SI_{sc1}}{SG_1 \times Area}\left[V_T\ln\left(\frac{I_{sc1}}{I_0}\right) + V_T\ln S\right] = FF\frac{I_{sc1}V_{oc1}}{G_1 \times Area}\left[1+\frac{V_T\ln S}{V_{oc1}}\right] \tag{3-23}$$

在相同光照强度前提下，应用式（3-21）中对效率的定义得：

$$\eta_1 = FF_1\frac{V_{oc1}I_{sc1}}{G_1 \times Area} \tag{3-24}$$

推导得出：

$$\eta = \eta_1\left[1+\frac{V_T\ln S}{V_{oc1}}\right] \tag{3-25}$$

通过式（3-25）可以得出这样一个假设：如果满足条件 $FF = FF_1$，那么能量转

换率的大小取决于光照强度比例因子 S 的对数。而式（3-25）的成立必须满足温度保持不变，短路电流的大小与光照强度成正比，以及填充因子的值与光照强度无关等条件。这在光照强度小于一个标准太阳光照强度时通常能够满足。

3.6 太阳电池的广义模型

到目前为止，所讲述的太阳电池的等效电路和 PSpice 模型，都是基于一个理想二极管并联一个理想电流源的太阳电池的特性所搭建的。但有时，这样的初级模型不足以精确地描述出由太阳电池所发出的最大功率。还有另外几个因素没有考虑到，它们会影响到太阳电池的响应。

（1）串联电阻

这个模型的主要局限因素之一是在实际的太阳电池中存在着串联电阻性损耗。事实上，在太阳电池内部，电池体内所产生的电流在流向电极触点时会流经阻性半导体材料，包括掺杂浓度低的基区以及虽然掺杂浓度高但很窄的发射区。除了这两部分之外，金属网格、触体和电流汇集母线也都增加了总串联电阻的损耗。通常的做法是，把这些串联损耗用集总电阻参数 R_s，即太阳电池的串联电阻来表示。

（2）并联电阻

工业上的太阳电池由大批量生产获得，一般是使用大面积的晶片或大面积的薄膜材料。一些并联电阻损耗是存在的，诸如在发射层的局部曲陷或者是在沿电池边界周边的短路分流。这时一般是用与原有元件并联的集总电阻参数 R_{sh}来描述的。

（3）复合

在太阳电池中，空间电荷区的复合现象表明在太阳电池内部，存在非欧姆式的电流路径与之并联，这与低电压偏置有关。它在等效电路中，可以用饱和电流密度为 J_{02}的第二个二极管来描述。与给定为 1 的理想太阳电池二极管的饱和电流密度不同，通常将它的值定义为 2。为此，只需在描述太阳电池模型的子电路中，增加 $n=2$ 的第二个二极管“diode2”即可。具体如下：

```
.model diode2 d(is={j02*area}, n=2)
```

（4）扩散二极管的非理想特性

实际情况很少有电池能够完全表现出系数为 1 的理想伏安特性。为此，通常用一个参数 n 来说明这些非理想因素。用上述对于复合二极管相同的处理方法，主二极管模型可以修改如下：

```
.model diode d(is={j0*area},n=1.1)
```

$n=1.1$ 是一个例子。

概括来讲，考虑到上述因素的影响后，电压和电流间新的关系如下所示：

$$I=I_L-I_0\left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}}-1\right)-I_{02}\left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}}-1\right)-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \qquad (3\text{-}26)$$

这个关系式是通过图 3-6 中所示的等效电路得出的。这里必须强调的是，在这个新的电路中短路电流的含义是需要改变的，因为这时短路条件是对应于太阳电池的外部接线端的，即图 3-6 中的节点（303）和节点（300）。而在第二章中式（2-2）、式（2-3）和式（2-6）所推导出的短路电流是应用于太阳电池的内部节点的，即如图 3-6a 中所示的节点（301）和（300）。这就是在图 3-6 中，等效电路的电流源现在被命名为 I_L 或者称之为光生电流的原因，用以区别于新的太阳电池短路电流。最后，在等效电路中用二极管 D1 来实现式（3-26）中的主二极管，用二极管 D2 来实现附加二极管。下面的例子将展示模型中所涉及的几个参数值，特别是光生电流和短路电流的不同是如何影响太阳电池的响应的。

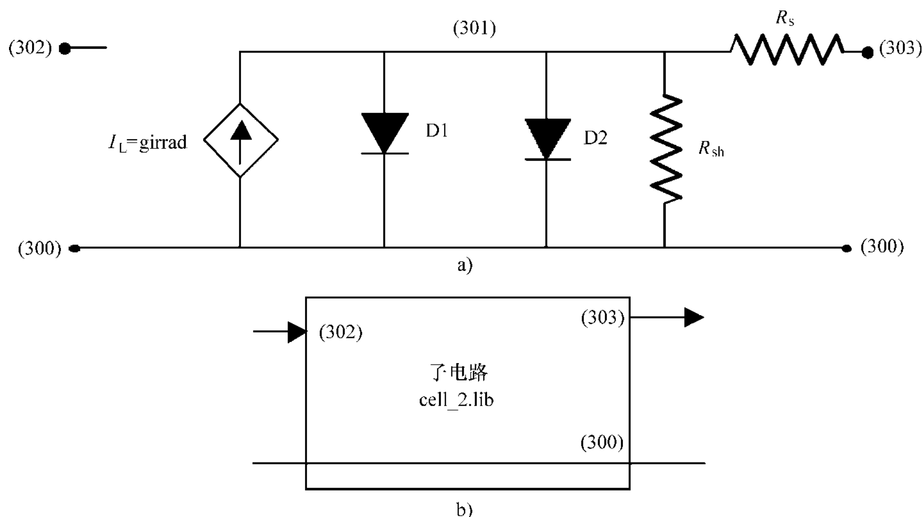


图 3-6　cell_2. lib 的子电路中包含两个二极管和串并联电阻

3.7　太阳电池的广义 PSpice 模型

图 3-6 所示电路，包括新的子电路和串并联电阻，可用 PSpice 代码来描述，如下面网表所示：

```
*CELL_2.LIB*
.subckt cell_2 300 303 302 params:area=1, j0=1, jsc=1, j02=1, rs=1, rsh=1

girrad 300 301 value={(jsc/1000)*v(302)*area}
d1 301 300 diode
.model diode d(is={j0*area})
d2 11 10 diode2
.model diode2 d(is={j02*area}, n=2)
.ends cell_2
```

在新的模型中，上述的各种影响因素用参数 j02、rs 和 rsh 来描述，它们都被赋予适当的值。为了绘制伏安特性曲线和分析新的参数值造成的影响，需建立一个“.cir”文件来调用新的子电路。这将在下一节讲述。

3.8　串联电阻对短路电流和开路电压的影响

在相同光照强度和环境温度，且保持较大的并联电阻值 $1\times10^5\Omega$ 不变的条件下，设定若干个不同的串联电阻值，对电路进行仿真，其仿真结果如图 3-7 所示。

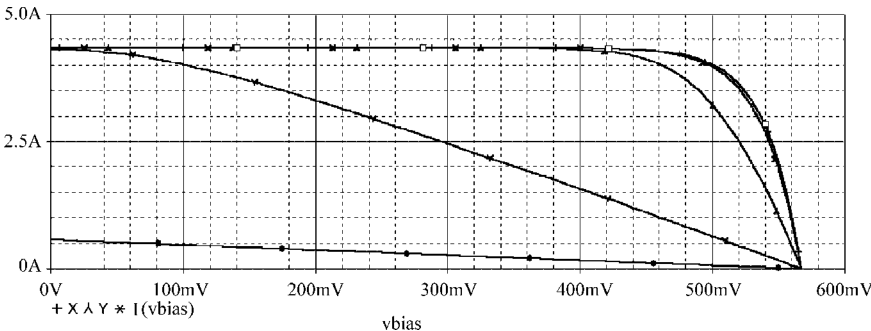


图 3-7　串联电阻的影响

注：串联电阻值按着 1Ω（最底下的曲线）、0.1Ω、0.01Ω、0.001Ω、0.0001Ω（最上面的曲线）变化的不同伏安特性曲线

通过调用带有参数{RS}作为串联电阻值的子电路，并使用“.step param”指令给{RS}赋予几个不同的值来实现仿真。其网表如下：

```
*cell_2.cir
.include cell_2.lib
xcell2 0 31 32 cell_2 params:area=126.6  j0=1e-11  j02=1e-9
+ jsc=0.0343 rs={RS} rsh=100000
.param RS=1
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias -0.1 0.6 0.01
.step param RS list 0.0001 0.001 0.01 0.1 1
.probe
.end
```

从图 3-7 中可以看出随着串联电阻值的增加，伏安特性曲线变化很大，特别是短路电流和填充因子的值会迅速减小。其中某些变化可以通过式（3-26）说明。这将在下面进行解释和总结。

（1）短路电流

与理想的结果相反，在短路状态时，短路电流值并不等于光电流 I_L。通过将

$V=0$代入式（3-26）中得：

$$I_{sc}=I_L-I_0\left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_T}}-1\right)-I_{02}\left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{2V_T}}-1\right)-\frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \tag{3-27}$$

在实际应用中，太阳电池的 I_{sc}与 I_L之间的差异是很小的。这是因为通过合理设计金属网格和掺杂度，就可以保持串联电阻很低；另外由后期制作检验使得太阳电池有较大的并联电阻。图 3-7 清楚地显示，当串联电阻值 $R_s \leqslant 0.01$ 时，短路电流的值基本保持不变。在本例中，考虑到太阳电池的面积为 126.6cm^2，这意味着如果这个短路电流保持不变，那么这一很小的串联电阻损耗是允许的。

（2）开路电压

将 $I=0$ 代入式（3-26）可得开路电压值如下：

$$0=I_L-I_0\left(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}}-1\right)-I_{02}\left(e^{\frac{V_{oc}}{2V_T}}-1\right)-\frac{V_{oc}}{R_{sh}} \tag{3-28}$$

很显然，通过式（3-28）推导得出的开路电压与串联电阻的大小无关，并且无论并联电阻和复合二极管的参数为多少，此结论都成立。如果忽略式（3-28）中的第三项和第四项，开路电压可表示如下：

$$V_{oc}=nV_T\ln\left(1+\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \tag{3-29}$$

该式除了考虑主二极管的非理想因数 n 之外，与式（3-7）使用理想等效电路所推导的结果相同。

如图 3-7 所示，所有曲线都与电压轴相交在同一点，由此可以确定开路电压的大小与串联电阻无关。

3.9　串联电阻对填充因子的影响

从图 3-7 中可以清楚地得出，在太阳电池的电气参数中，填充因子是受串联电阻影响最大的参数之一。

如果只局限于分析串联电阻所造成的影响，那么太阳电池就可以用扩散二极管和串联电阻来模拟。此时式（3-26）简化成：

$$I=I_L-I_0\left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}}-1\right) \tag{3-30}$$

在开路条件下：

$$0=I_L-I_0\left(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}}-1\right) \tag{3-31}$$

通过式（3-31）可得 I_0如下：

$$I_0=\frac{I_L}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}}-1\right)}\approx I_L e^{-\frac{V_{oc}}{nV_T}} \tag{3-32}$$

代入式（3-30）中得：

$$I = I_L - I_L e^{-\frac{V_{oc}}{nV_T}}\left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1\right) \approx I_L\left(1 - e^{\frac{V+IR_s-V_{oc}}{nV_T}}\right) \tag{3-33}$$

在最大功率点处：

$$I_m \approx I_L\left(1 - e^{\frac{V_m+IR_s-V_{oc}}{nV_T}}\right) \tag{3-34}$$

用电压 V 乘以式（3-34）并使其乘积的导数等于零，最大功率点的坐标可由下式得出：

$$I_m + (I_m - I_L)\left(\frac{V_m - I_m R_s}{nV_T}\right) = 0 \tag{3-35}$$

如果 V_{oc} 与 I_L 已知，则式（3-34）和式（3-35）给出 I_m 和 V_m 的值。

使用与上面相同的简化方式，假设太阳电池所产生的最大功率可以由下式计算得出：

$$P'_m = P_m - I_m^2 R_s \tag{3-36}$$

P'_m 是当 R_s 不为零时的最大功率。这个公式表明，最大功率点大约在同一电流值 I_m 的附近变化。

把式（3-36）的右侧第二项分别乘以和除以 V_m，使其变化成如下形式：

$$P'_m = P_m\left(1 - \frac{I_m}{V_m}R_s\right) \tag{3-37}$$

如果进一步假设：

$$\frac{I_m}{V_m} \approx \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \tag{3-38}$$

代入到式（3-37）中得：

$$P'_m = P_m\left(1 - \frac{I_{sc}}{V_{oc}}R_s\right) = P_m(1 - r_s) \tag{3-39}$$

其中：

$$r_s = \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \tag{3-40}$$

是串联电阻归一化的值。归一化因数是开路电压与短路电流的比值。

式（3-40）的结果就很容易地转换为填充因子与串联电阻的关系，如下：

$$FF = \frac{P'_m}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{P_m(1 - r_s)}{V_{oc}I_{sc}} = FF_0(1 - r_s) \tag{3-41}$$

该公式描述了在串联电阻非零时的填充因子 FF 和串联电阻为零时的填充因子 FF_0 之间的关系。假设短路电流和开路电压的值都与串联电阻无关时，该等式成立。

例 3.3 根据本章前面内容中所给出的太阳电池数据和 PSpice 模型，对如下参数的太阳电池进行仿真：Area = 126.6cm²，$J_0 = 10^{-11}$ A/cm²，$J_{sc} = 0.0343$ A/cm²，

$R_{sh}=100\Omega$，串联电阻的值分别为 $10^{-4}\Omega$、$10^{-3}\Omega$、$2\times10^{-3}\Omega$、$5\times10^{-3}\Omega$、$10^{-2}\Omega$、$2\times10^{-2}\Omega$、$5\times10^{-2}\Omega$、$10^{-1}\Omega$。计算出填充因子 FF 的值并与通过式（3-41）计算得出的结果相比较。

首先写出如附录 C 中所示的“example3_3”文件。然后运行 PSpice 得出最大功率点的值，见表 3-5。

表 3-5　例子 3.3 的结果

串联电阻 R_s/Ω	最大功率 P_m/W	FF	归一化的串联电阻值 r_s	$FF_0\ (1-r_s)$
0.0001	2.02	0.82	7.69×10^{-4}	0.819
0.001	2.004	0.814	7.69×10^{-3}	0.813
0.002	1.98	0.8	0.0153	0.807
0.005	1.93	0.78	0.038	0.788
0.01	1.85	0.75	0.076	0.757
0.02	1.689	0.686	0.15	0.697

用 PSpice 进行仿真，并计算出填充因子值和与之对应的归一化的串联电阻值的关系如图 3-8 所示。图中还同时给出由式（3-41）得出的值以作比较。可以看出，当串联电阻值较小时两者相当一致，随着串联电阻值的增加而愈加发散。

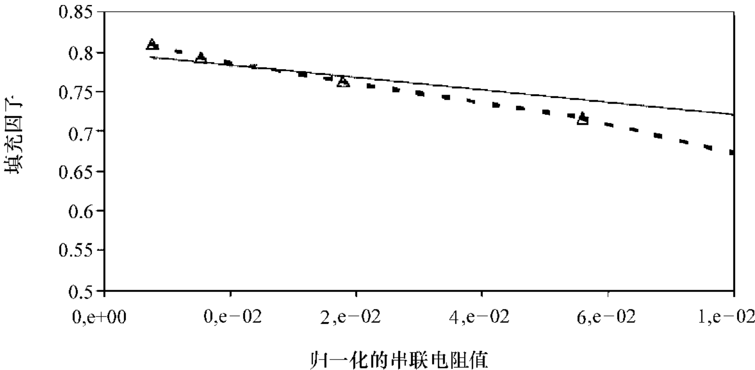


图 3-8　例 3.3 中串联电阻归一化的值与填充因子的关系曲线

注：实线是通过式（3-41）计算得出的值，虚线是 PSpice 仿真得出的值。

3.10　并联电阻的影响

并联电阻也会降低太阳电池的性能。为了单独观察并联电阻所造成的影响，通过给 R_s 赋一个很小的值，即令 $R_s=1\times10^{-6}\Omega$，$J_02=0$，以消除串联电阻和附加二极管的影响。这时的 PSpice 电路，如附录 C 中“shunt. cir”文件所示，就可以对几个不同的并联电阻值求解了。

结果如图 3-9 所示。很明显除非并联电阻值非常小，否则开路电压变化甚微。

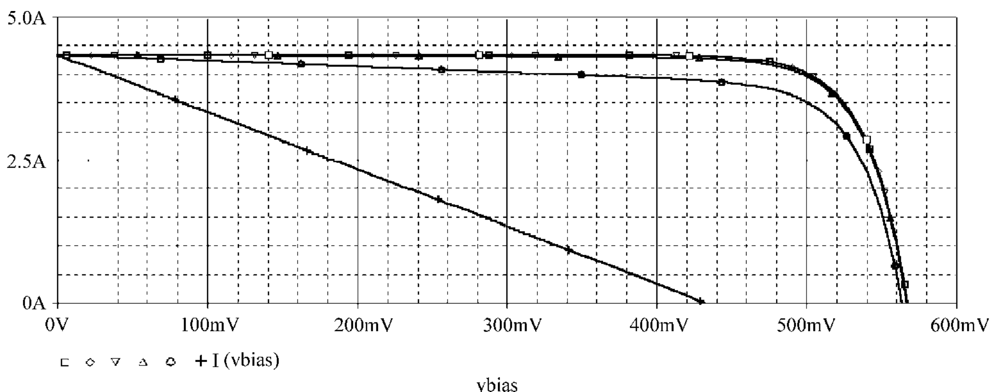


图 3-9　并联电阻对伏安特性曲线的影响

另一方面，在短路条件下，图中所有的曲线都相交于一点。这是实际中的正常结果，因为令式（3-26）中的 $R_s=0$，$J_{02}=0$，在 $V=0$ 时有：

$$I_{sc}=I_L \tag{3-42}$$

这说明短路电流的大小与 R_{sh} 无关。另外，如果观察在反向偏置条件下 $V<<0$ 的伏安特性，可得：

$$I=I_L-\frac{V}{R_{sh}} \tag{3-43}$$

这表明伏安特性曲线是一条斜率为（$-1/R_{sh}$）的直线。即使很小的并联电阻值也可以使填充因子大大降低。

3.11　复合二极管的影响

如图 3-10 所示，随着复合二极管作用的增强，开路电压随之下降。图中为了突出复合二极管的影响，选择了一个很高的并联电阻值和一个很低的串联电阻值。

图中分别绘制不同 J_{02} 时的伏安曲线，即 1×10^{-8} A/cm^2、1×10^{-7} A/cm^2、1×10^{-6} A/cm^2、1×10^{-5} A/cm^2、1×10^{-4} A/cm^2。其相应的网表如附录 C 中的 "diode_rec. cir" 文件所示。

图 3-10 仿真结果表明，当复合二极管占主导地位时，无论是开路电压还是填充因子 FF 的特性都明显降低，而短路电流保持不变。

3.12　温度影响

太阳电池的工作温度对其自身的电气响应有着严重的影响。考虑到在地面应用

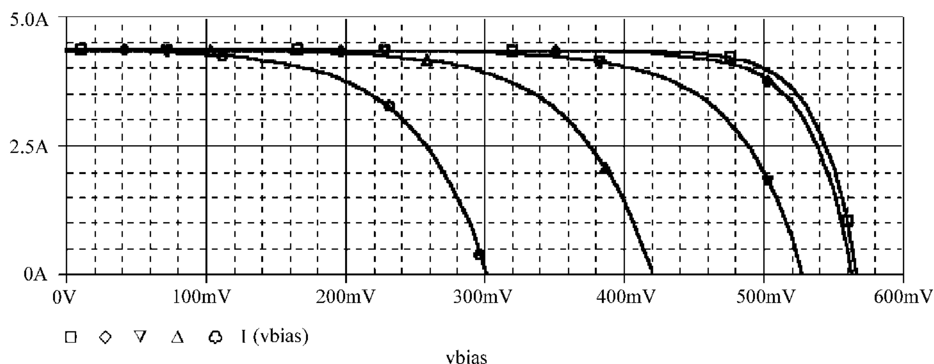


图 3-10　复合二极管的影响

时，太阳电池可以轻松地升温到 60～65°C，而如果是在空间或者卫星应用时其温度可能上升得更高。在一个合理的模型中，其主要电气参数中的温度系数是必须给定的。

温度对太阳电池的影响，在其 PSpice 的等效电路中可以体现在设置二极管模型的内置参数上，二极管的饱和电流密度对温度有很大依赖性，它通常由下式给出：

$$J_0 = BT^{\mathrm{XTI}} \mathrm{e}^{-\frac{E_g}{kT}} \tag{3-44}$$

式中，B 是不随温度变化的常量，XTI 也是一个不受温度影响的 PSpice 参数。式（3-44）对任意温度值都有效。带入参考温度 T_{nom}时，式（3-44）表示如下：

$$J_0(T_{\mathrm{nom}}) = BT_{\mathrm{nom}}^{\mathrm{XTI}} \mathrm{e}^{-\frac{E_g(T_{\mathrm{nom}})}{kT_{\mathrm{nom}}}} \tag{3-45}$$

式（3-44）被式（3-45）除，然后两边取对数，结果如下：

$$\ln\left[\frac{J_0}{J_0(T_{\mathrm{nom}})}\right] = \mathrm{XTI}\ln\left(\frac{T}{T_{\mathrm{nom}}}\right) + \frac{E_g(T_{\mathrm{nom}})}{kT_{\mathrm{nom}}} - \frac{E_g}{kT} \tag{3-46}$$

在任何温度 T 下，半导体的能带间隙值 E_g可由下式给出：

$$E_g = E_{g0} - \frac{\mathrm{GAP1} \cdot T^2}{\mathrm{GAP2} + T} \tag{3-47}$$

式中，E_{g0}是由推测得出 $T=0\mathrm{K}$ 时的半导体的能带间隙。

例 3.4　假设 $J_{sc}=0.343\mathrm{A/cm^2}$，$J_0=1\times10^{-11}\mathrm{A/cm^2}$，设定几个理想的温度，即 27℃、35℃、40℃、45℃、50℃、55℃和 60℃，绘制出直径为 5in 的硅太阳电池的伏安特性。在分析中，假设短路电流与温度无关。

现在必须对网表进行修改，包括对温度的分析。在下列网表中可明显看到：

```
*temp.cir
.include cell_3.lib
xcell3 0 31 32 cell_3 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=1e-6 rsh = 1000
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.temp 27 35 40 45 50 55 60

.probe
.end
```

在本节中为突出温度对太阳电池的影响，令 $J_{02}=0$，并使用很小的串联电阻值和较大的并联电阻值来简化太阳电池模型。如附录 C 所示，测量电路中的子电路模型已经变成“cell_3. lib”文件，其中的二极管模型添加了一个参数，即硅型半导体的能带间隙 $E_{g0}=1.17\text{eV}$。

仿真结果如图 3-11 所示。

使用指针绘制该模型的曲线，很容易获得其在不同温度下的开路电压值，结果见表 3-6。

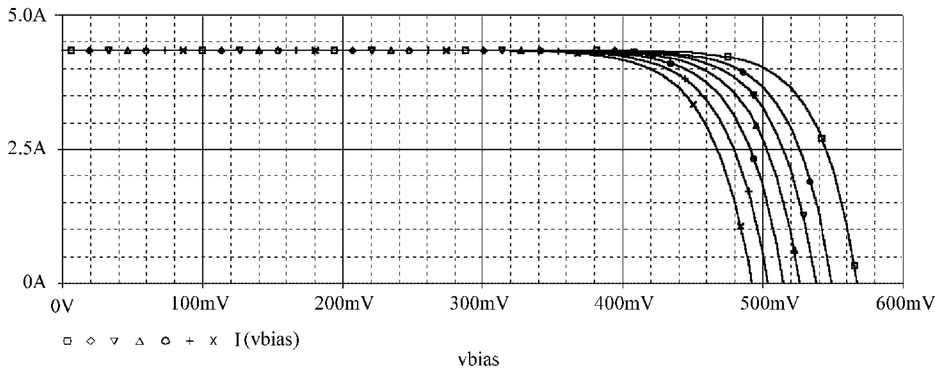


图 3-11　温度的影响

表 3-6　不同温度下的开路电压值和开路电压的温度系数值

温度/℃	27	35	40	45	50	55	60
V_{oc}/mV	567.5	550	538.4	526.9	515.3	503.8	492.9
$\Delta V_{oc}/\Delta T$/(mV/℃)		−2.18	−2.3	−2.3	−2.31	−2.31	−2.18

通过计算可得出，在不同的工作温度下，表 3-6 的第二行所示的值接近 −2.3mV/℃。这个结果与由式（3-48）将开路电压对温度求导数所推得的理论结果是一致的：

$$\frac{\mathrm{d}V_{oc}}{\mathrm{d}T}=\frac{V_T}{T}\ln\frac{J_{sc}}{J_0}+V_T\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}T}\left(\ln\frac{J_{sc}}{J_0}\right) \tag{3-48}$$

假设短路电流不受温度影响，至少在式（3-48）中相对其他参数它受温度的影响很小，这样可以得出：

$$\frac{\mathrm{d}V_{oc}}{\mathrm{d}T}=\frac{V_T}{T}\ln\frac{J_{sc}}{J_0}-V_T\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}T}(\ln J_0) \tag{3-49}$$

引入式（3-44）：

$$J_0=CT^{\gamma}\mathrm{e}^{-\frac{E_{g0}}{kT}} \tag{3-50}$$

式中，C 和 γ 是与温度无关的常量。将式（3-50）代入式（3-49）中，并考虑到式（3-51）：

$$V_{oc}=V_T\ln\left(1+\frac{J_{sc}}{J_0}\right)\approx V_T\ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) \tag{3-51}$$

得出：

$$\frac{\mathrm{d}V_{oc}}{\mathrm{d}T}=\frac{V_{oc}}{T}-\frac{\gamma V_T}{T}-\frac{E_{g0}}{qT} \tag{3-52}$$

将典型的硅半导体的参数引入式（3-52），在 $\gamma=3$ 时经过计算得到硅太阳电池开路电压的温度系数值大约为 $-2.3\mathrm{mV/°C}$。

虽然在许多场合可以接受短路电流不随温度变化这个假定，但也可引入短路电流的温度系数以计入温度的影响。硅太阳电池短路电流的温度系数常用的典型值为 $6.4\times10^{-6}\mathrm{A/cm^2℃}$。

考虑了短路电流的温度系数后，对太阳电池模型的子电路进行修改，如例 3.5 所示。

例 3.5

（1）新建一个 PSpice 子电路，增加温度和短路电流的温度系数两个参数。

解决方案如下：

```
*cell_4.lib
.subckt cell_4 300 303 302 params:area=1, j0=1, jsc=1, j02=1, rs=1,
+rsh=1,temp=1,isc_coef=1

girrad 300 301 value={(jsc/1000)*v(302)*area+isc_coef*(area)*(temp-25)}
d1 301 300 diode
.model diode d(is={j0*area},eg=1.17)
d2 301 300 diode2
.model diode2 d(is={j02*area}, n=2)
rs 301 303 {rs}
rsh 301 300 {rsh}
.ends cell_4
```

（2）在温度为 80℃，短路电流温度系数为 6.4×10^{-6} A/cm^2℃，其他参数与例 3.4 相同的条件下计算太阳电池的响应。

解决方案如下：

建立“.cir”文件

```
*temp_2.cir
.include cell_4.lib
xcell 30 31 32 cell_4 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=0
+ jsc = 0.0343 rs=1e-6 rsh=1000 temp=80 isc_coef=6.4e-6
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.temp 80

.probe
.end
```

温度为 80℃时按指定的温度系数的计算结果如图 3-12 所示。通过 PSpice 仿真得出短路电流为 4.38A、开路电压为 446mV。

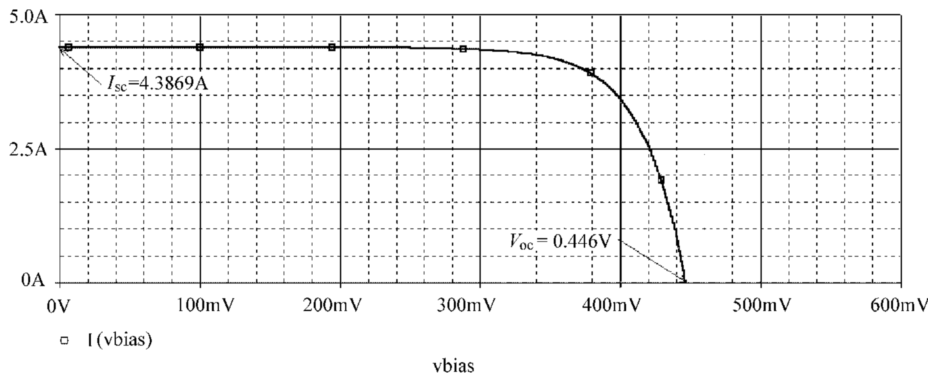


图 3-12　例 3.5 仿真伏安特性曲线

3.13　空间辐射的影响

空间辐射的主要影响涉及半导体块中少数载流子寿命的退化，从而导致暗电流密度的增加，以及所产生光电流的衰减。总之，这些影响使得太阳电池的最大功率明显降低。这可以用经验公式分析给定的高能粒子积分通量 Φ 对如下几个参数的影响获得：短路电流值、开路电压值和最大功率点。粒子通量 Φ 的单位是每单位面积上的粒子数，这个量级必须明确区别于第 2 章所使用的光子通量 Φ。

$$J_{sc}(\Phi) = J_{sc}(\text{BOL}) - K_J \log\left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_J}\right) \tag{3-53}$$

$$V_{oc}(\Phi) = V_{oc}(\text{BOL}) - K_V \log\left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_V}\right) \tag{3-54}$$

$$P_{max}(\Phi) = P_{max}(\text{BOL}) - K_p \log\left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_p}\right) \tag{3-55}$$

在式（3-53）、式（3-54）和式（3-55）中，各常量可以从太阳电池空间退化度的现有数据推导得出。而这些数据对于各种太阳电池、粒子类型和积分通量都是已知的[3.3]。作为例子，表 3-7 给出了根据参考文献［3.3］中的退化度曲线图计算出的硅太阳电池和砷化镓太阳电池的参数值。其中 K_i 和 Φ_i 代表参数 K_I 和短路电流，K_v 代表开路电压，K_p 代表最大功率。

表 3-7　$J_{sc}V_{oc}$和 P_{max}的空间退化度

	硅片电阻率为 2Ω · cm 的漂移场太阳电池			砷化镓/锗太阳电池		
	短路电流 (mA/cm²)	开路电压 (mV)	最大功率 (mW/cm²)	短路电流 (mA/cm²)	开路电压 (V)	最大功率 (mW/cm²)
K_i	5.26	42	2.91	10.9	93.5	8.79
Φ_i/(1/cm²)	3.02×10^{13}	2.99×10^{12}	5.29×10^{12}	2.51×10^{14}	1×10^{14}	1.55×10^{14}

在给定光通量后，也可以用 PSpice 对太阳电池的伏安特性进行仿真。其输入参数是已知的起始寿命（BOL）时的 J_{sc}、V_{oc}和 P_{max}，输出是给定一个空间辐射积分通量 Φ 后的整个伏安特性。要执行这个仿真，有以下几个步骤：

步骤一：计算初始寿命（BOL）条件下的 J_0 值。

首先，回顾一下最简单的开路时的太阳电池模型：

$$J = 0 = J_{sc} - J_0\left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1\right) \tag{3-56}$$

显然，在初始（BOL）条件下：

$$J_0(\text{BOL}) = J_{sc}(\text{BOL})\,e^{-\frac{V_{oc}(\text{BOL})}{V_T}} \tag{3-57}$$

步骤二：在初始寿命（BOL）条件下，计算填充因子的理想值。

也就是计算串联电阻为零时太阳电池的填充因子。为此在这里重新给出式（3-17）：

$$\text{FF}_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \tag{3-58}$$

其中：

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T} \tag{3-59}$$

式中，v_{oc}为开路电压的归一化值。

步骤三：计算初始寿命（BOL）条件下的串联电阻值。

这很容易由以下计算获得：

$$FF(BOL) = FF_0(BOL)(1 - r_s) \tag{3-60}$$

经过逆归一化之后：

$$R_s = \frac{V_{oc}}{J_{sc} \times Area} - \frac{P_{max}}{FF_0(BOL) \times J_{sc}^2 \times Area} \tag{3-61}$$

步骤四：建立太阳电池模型，该模型考虑了表 3-6 给出的参数所确定的退化度特性。

$$J_0(\Phi) = J_{sc}(\Phi) e^{-\frac{V_{oc}(BOL) - K_V \log\left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_V}\right)}{V_T}} \tag{3-62}$$

利用式（3-53）同样可求出短路电流。假设串联电阻的大小不因光照强度而改变。

例 3.6　一块面积为 $8cm^2$ 的硅太阳电池，在空间中受到一组光通量值分别为 $1 \times 10^{10} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{11} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{12} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{13} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{14} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{15} MeV/cm^2$、$1 \times 10^{16} MeV/cm^2$的辐照。设初始寿命（BOL）数据如下：$V_{oc} = 0.608V$，$J_{sc} = 0.0436A/cm^2$，$P_{max} = 20.8mW/cm^2$。使用 PSpice 仿真出该电池的伏安特性。假设这个太阳电池可用一个二极管等效，且并联电阻值为无穷大。

在使用 PSpice 解决这个问题之前，在此引述上面所描述的几个步骤。为了计算一些重要的数值，需引用表 3-7 中的退化度常量。

步骤一：

根据式（3-57）得：

$$J_0(BOL) = J_{sc}(BOL) e^{-\frac{V_{oc}(BOL)}{V_T}} = 43.6 \times 10^3 e^{-\frac{0.608}{0.026}} A = 17 \times 10^{-12} A$$

步骤二：

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T} = \frac{0.608}{0.26} = 23.38$$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} = 0.828$$

步骤三：

$$R_s = \frac{V_{oc}}{J_{sc} \times Area} - \frac{P_{max}}{FF_0(BOL) \times J_{sc}^2 \times Area} = \frac{0.608}{0.0436 \times 8} - \frac{0.02}{0.828 \times (0.0436)^2 \times 8} \Omega = 0.115\Omega$$

步骤四：

对于每一个能量密度值，J_0 可由下式计算：

$$J_0(\phi) = J_{sc}(\phi) e^{\frac{V_{oc}(BOL) - K_V \log\left(\frac{1+\phi}{\phi_V}\right)}{V_T}}$$

参照附录 C 建立一个 PSpice 的子电路“cell_5. lib”，其中二极管模型的参数“is”由式（3-62）给出。此外，通过式（3-61）计算可得到串联电阻。

计算出完整的伏安特性的 . CIR 文件也在附录 C 中给出，称为 space. cir。

PSpice 代码中的参数名称和公式中的变量名之间的对应关系如下：

PSpice 中参数	式（3-45）~式(3-51）中的参数
vocbol	V_{oc}（BOL）
jscbol	J_{sc}（BOL）
fi	Φ_i
f	Φ
fv	Φ_v
kv	K_v
ki	K_i
jo	J
vocnorm	v_{oc}
uvet	V_T

所得到的伏安特性曲线如图 3-13 所示。

经计算得，太阳电池传送的最大功率为 79. 665mW，即 9. 95mW/cm^2。此值近似等于对退化后的最大功率的期望值。它可由表 3-7 中所给出的最大功率的退化度常数计算得到。

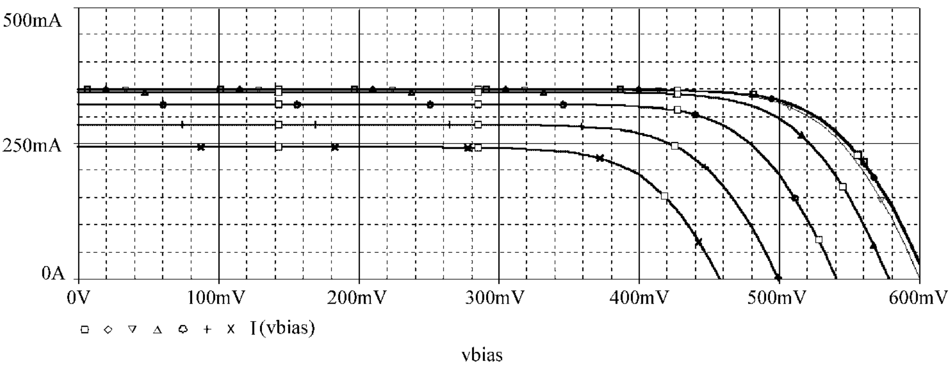


图 3-13　例 3. 6 硅太阳电池受到空间光通量为 1×10^{10}MeV/cm^2、1×10^{11}MeV/cm^2、1×10^{12}MeV/cm^2、1×10^{13}MeV/cm^2、1×10^{14}MeV/cm^2、1×10^{15}MeV/cm^2、1×10^{16}MeV/cm^2 的辐照，衰减退化之后的特性曲线

3.14 太阳电池的行为模型

为了对 PV 发电系统进行建模，通常需要在不同的光照强度和温度条件下，对太阳电池的行为进行仿真。这意味着，用 PSpice 内部设置温度参数来分析的方式不再适用，因为 PSpice 每分析一个温度值都要重新运行一次。通常所得到的结果要么是一个文件，要么是一个光照和温度值的时间序列。此外，如果所选用的太阳电池不是由大家所熟知的硅、砷化镓或锗等半导体构成的，那么用来仿真太阳电池的温度影响所需要的一些重要物理数据就不那么容易获得。通常这些数据来自生产厂家的产品手册或者公开发表的资料，并且涉及在标准条件下 PV 测量所得的电气参数，如短路电流、开路电压、最大功率，以及温度系数等。在这种情况下，只包括一个二极管的太阳电池模型是不太实用的，其用处极其有限。为此，我们引入一个基于电压源和电流源，以电气参数值作为唯一输入的行为模型，它能够正确地模拟在任意光照强度和温度条件下太阳电池的行为。

该模型假设太阳电池可以通过两个电流源和一个串联电阻来模拟。如图 3-14 所示，该模型由一个具有节点（10）、（14）、（12）、（13）的子电路组成，其中两个 G－源具有如下的两个功能：

$$i(\text{girrad})=\frac{J_{\text{scr}}A}{1000}G+\left(\frac{\mathrm{d}J_{\text{sc}}}{\mathrm{d}T}\right)(T_{\text{cell}}-T_{\text{r}}) \tag{3-63}$$

由此可得在光照强度 G 条件下的短路电流值。式（3-63）中的导数是短路电流的温度系数，其值在所使用的温度范围内保持恒定。T_{r} 为参考温度，通常认为是 25℃（在某些情况下被认为是 300°K）。这个 G－源的代码可表示如下：

```
girrad 10 11 value = {(jscr/1000 * v(12) * area) + coef_jsc * area * (v(17) - 25)}
```

第二个直流源是用来代替二极管的，用它来给出太阳电池的指数项：

$$i(\text{gidiode})=\frac{J_{\text{sc}}(\text{Area})}{\left(e^{\frac{V_{\text{oc}}}{V_{\text{T}}}}-1\right)}\left(e^{\frac{V}{V_{\text{T}}}}-1\right) \tag{3-64}$$

节点（305）的电压给出的是 J_{sc}的值，节点（306）给出的是开路电压的值。

式（3-64）所涉及的温度值是指太阳电池的工作温度 T_{cell}，它通常是源自 NOCT 的概念。NOCT 是指额定工作条件下的温度，即在光照强度为 800W/m²，环境温度为 20℃的条件下电池的温度。

$$T_{\text{cell}}-T_{\text{a}}=\frac{\text{NOCT}-20}{800}G \tag{3-65}$$

将电池温度写入 PSpice 中，如图 3-14 所示。

在新的光照强度和温度条件下的开路电压也已被写入 PSpice。

在相同光照强度，以及两个不同温度条件下，开路电压的温度系数可通过下面

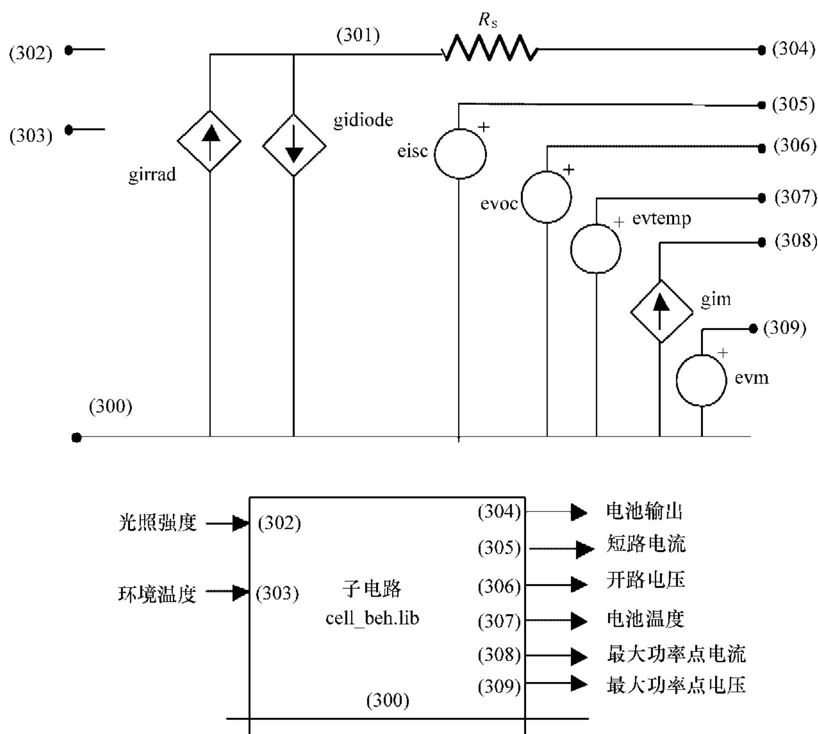


图 3-14　太阳电池行为模型的电路图和框图

式子计算得出：

$$\left(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T}\right)_G (T_{cell} - T_r) = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{scr}}{I_0}\right) - V_{ocr} \tag{3-66}$$

同时加上再减去一个任意光照强度和温度条件下的 V_{oc} 的值，如下：

$$\left(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T}\right)_G (T_{cell} - T_r) = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{scr}}{I_0}\right) - V_{ocr} + V_{oc} - V_{oc} \tag{3-67}$$

代入：

$$V_{oc} = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0}\right) \tag{3-68}$$

得出：

$$V_{oc} = V_{ocr} + \left(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T}\right)_G (T_{cell} - T_r) + V_T \ln \frac{1 + \frac{I_{sc}}{I_0}}{1 + \frac{I_{scr}}{I_0}} \tag{3-69}$$

一般情况，当短路电流不为零时，式（3-69）末项的分子和分母中的 1 可忽略，可得下式：

$$V_{oc} \approx V_{ocr} + \left(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T}\right)_G (T_{cell} - T_r) + V_T \ln \frac{I_{sc}}{I_{scr}} \tag{3-70}$$

此处，V_T是在电池温度 T_{cell}下的估算值。

串联电阻可通过下式计算得出：

$$R_s = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} - \frac{P_{max}}{FF_0 I_{sc}^2} \quad (3\text{-}71)$$

其中，FF_0 由式（3-17）给出，而 P_{max}是单位面积的最大功率。相关的 PSpice 代码编写如下：

```
rs n+ n- {vocr/(jscr*area)-pmaxr/(jscr**2*area*(vocr/0.026-log((vocr/0.026)
 +0.72))/(1-vocr/0.026))}
```

这是在与电池温度无关的标准温度条件下计算所得的值。

在 PV 发电系统中，在一段给定的时间内，最大功率点坐标的动态信息是很重要的。因为在设计用以将 PV 器件与负载相连接的电子设备时，要使它跟踪最大功率点。这段 PSpice 的代码通过在电池子电路的两个可用节点，也给出了最大功率点的信息。我们所需要的仅是在标准 V_{mr}和 I_{mr}状况下最大功率点的坐标，这在厂家提供的大多数产品手册中都会给出。这种情况下，在任意光照强度和温度条件下的最大功率点处的电流，与光照强度呈正比，与温度和短路电流的温度系数呈线性关系。其表达式如下：

$$I_m = I_{mr}\frac{G}{G_r} + (\text{Area})\text{Coe}f - j_{sc}(T_{cell} - T_r) \quad (3\text{-}72)$$

根据这个电流值 I_m，并考虑式（3-37），得到：

$$I_m = I_{sc} - I_0\left(e^{\frac{V_m + I_m R_s}{V_T}} - 1\right) \quad (3\text{-}73)$$

可计算得出最大功率点处的电压值如下：

$$V_m = V_T \ln\left[1 + \frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}}\left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1\right)\right] - I_m R_s \quad (3\text{-}74)$$

上述各式可在附录 C 所给出 PSpice 的库文件“cell_beh. lib”中运行。图 3-14 给出了它的框图。

例 3.7 考虑一个具有如下电气特性的铜铟镓硒（CIGS）太阳电池：V_{ocr} = 0.669V，J_{scr} = 35.7mA/cm^2，P_{maxr} = 18.39mW/cm^2。这些值来自 M. A. Green，K. Emery，D. L. King，S. Igari，W. Warta 著《太阳电池的效率表（版本 18）》（PV 的发展，193 ~287 页，2001 年 7 ~8 月）。

短路电流的温度系数为 +12.5μA/cm^2℃，开路电压的温度系数为 −3.1mV/℃。这些值已由“www. siemenssolar. com/st5. html”用来估算面积为 1cm^{2}的电池。在附录 C 中列出了应用于“cell_beh. cir”文件的 PSpice 模型“cell_beh. lib”，并用它绘出了伏安特性曲线。结果如图 3-15 所示，可以看出，该模型能够仿真太阳电池的伏安特性曲线。

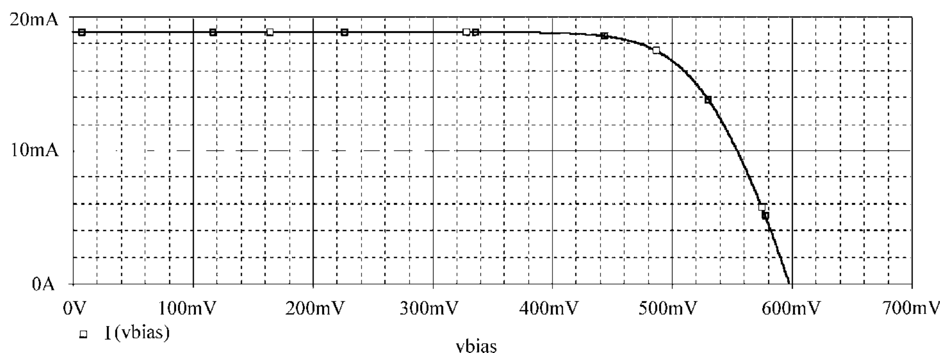


图 3-15　使用太阳电池行为模型仿真的铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池伏安特性曲线

3.15　用太阳电池行为模型和 PWL 电源来模拟太阳电池对温度和光照强度时间序列的响应

第 2 章中所描述的行为模型，其目的是用于模拟一个特定的太阳电池对其周围温度和光照强度共同作用下时间序列的响应。虽然在接下来的章节中，将会经常使用这些变量的时间序列，但是这里顺便指出重要的两点，它们不仅有助于加深对太阳电池仿真的理解，同时也对 PV 系统 PSpice 仿真的理解有所帮助。这两点分别是时间单位和变量单位。

3.15.1　时间单位

PV 系统的正常运行一般都要持续很长一段时间，如果可以对任意光照强度和温度曲线条件下 PV 系统的长期运行进行仿真，将会对 PV 系统的设计和确定其规模的过程有很大帮助。显然，这种仿真需要占用很长的 CPU 时间，因而很繁琐或难以实现。克服这些问题的一个简单方法是考虑两个不同的时间单位：一个是 PSpice 内部的仿真时间单位；另一个是实际的 PV 发电系统的运行时间。这意味着，如果设置 PSpice 内部仿真时间 1μs 对应于实际时间的 1h，则在任意一台标配的 PC 上，对应实际一天时间的仿真将在几秒内执行完。本书中这种方法已在必要时被使用。为了便于理解，对所有存在 PSpice 内部的时间单位和实际单位差异的图形都给出了说明。

3.15.2　变量单位

在 PSpice 文件中，用来模拟 PV 发电系统的输入和输出变量需要满足一定的要求。例如输入的光照强度值和温度值等变量，或者输出的仿真结果，如电池的充电状态或发动机的角速度等都是非电变量。PSpice 是一个只能对电气量作处理的工具，这意味着，在 PSpice 中内部变量的单位仅限于电气参数的单位。很明显，在 PV 发电系统中，必须对非电气变量作处理，用等效的电气参数来替代相应的非电气量参数。例如，如果想将温度作为输入，则需要使用电压源把温度转换成电压参数来输入到电路中。如将 1V 的电压源对应 1℃ 的温度，这样就完成了一个不同域的单位转换，用一个 PSpice 内部的电气单位（V）来代表实际的热单位（℃）。为

了避免混淆，必要时在本书中都给出了提示。实际上，在第 1 章和第 2 章中，我们在处理光谱辐射度和波长时，就使用了不同域间的单位转换。但是在此再次强调这个问题是因为，从现在起，不同域间的单位转换将对以后的仿真起重要作用。

为了说明上面提及的问题，引入这样一个例子：假设已知一天中 10 组光照强度和温度值，想知道太阳电池随时间变化的发电情况。在 PSpice 代码中，光照强度和温度值以一个分段线性电压源的方式输入，内部的时间单位为 1μs，对应实际 1h。

例 3.8 假设光照强度和温度值如下表所示：

时间/h	光照强度/(W/m^2)	温度/℃
6	0	12
8	100	12
10	200	15
11	400	18
12	450	20
13	800	22
15	750	21
17	300	17
19	200	15
20	0	13

(1) 写出 PWL 电源和 PSpice 文件来计算随时间变化的特性。

在子电路中，修改作为光照强度和温度输入的电压源如下：

```
virrad node+ node- pwl 6u 0 8u 100 10u 200 11u 400 12u 450 13u 800 15u 750 17u 300 19u 200 20u 0
  vtemp node+ node- pwl 6u 12 8u 12 10u 15 11u 18 12u 20 13u 22 15u 21 17u 17 19u 15 20u 13
```

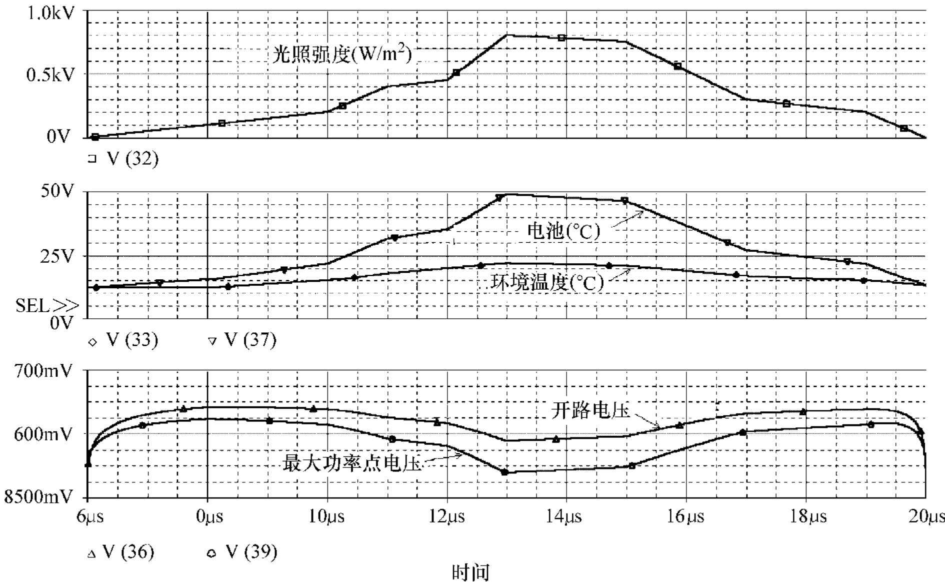


图 3-16 行为模型和 PWL 源对时间序列的仿真

注：PSpice 内部的时间单位是 μs，对应实际的时间单位是小时。内部光照强度单位是 V，对应实际的单位是 W/m^2。内部温度单位是 V，对应实际的单位是℃。

（2）建立一个 PSpice 的“. cir”文件，调用太阳电池的行为模型，并对本例进行 10h 的瞬态分析。

```
*cell_pwl.cir

.include cell_beh.lib
xcellbeh 0 32 33 34 35 36 37 38 39 cell_beh params:area=1, tr=25, jscr=0.0375,
+ pmaxr-0.0184, vocr-0.669, jmr - 35.52e-3, vmr-0.518, noct-47,
+ coef_jsc-12.5e-6, coef_voc--3.1e-3

virrad 32 0 pwl 6u 1 8u 100 10u 200 11u 400 12u 450 13u 800 15u 750 17u 300 19u 200 20u 0
vtemp 33 0 pwl 6u 12 8u 12 10u 15 11u 18 12u 20 13u 22 15u 21 17u 17 19u 15 20u 13
rim 38 0 1
vbias 34 0 dc 0
.tran 0 20u 6u 0.01u
.probe
.end
```

短路状态由一个辅助电压源 vaux = 0 来实现，通过它能测量出短路电流的值。结果如图 3-16 所示，可以看出，光照强度和温度随时间的变化能够被准确处理。

3.16　习题

3.1　用 $r_s=0$，$R_{sh}=\infty$ 的太阳电池的单二极管模型，绘制出理想的太阳电池伏安特性曲线，并求其开路电压和短路电流的值。设定光照强度为 1000W/m²，$J_{sc}=0.035\text{A/cm}^2$，$I_0$ 分别为如下值：$I_0=1\times10^{-11}$A，$I_0=1\times10^{-10}$A 和 $I_0=1\times10^{-9}$A。

3.2　一种用于测量太阳电池串联电阻大小的方法，是基于将几个不同的光照强度下的 I_{sc} 和 V_{oc} 的值与夜间伏安特性曲线相对比得出。编写一段工作在 27℃条件下的太阳电池的 PSpice 代码，具体参数如下：$J_{sc}=0.0343\text{A/cm}^2$，$j_{01}=1\times10^{-11}\text{A/cm}^2$，$j_{02}=0$，$r_{sh}=1\times10^6\Omega$，Area = 126.6cm² 且 $r_s=0.05\Omega$，绘制如下光照强度下的伏安特性曲线：200W/m²、400W/m²、600W/m²、800W/m²、1000W/m² 及 1200W/m²；并列出所有光照强度下的 I_{sc} 和 V_{oc} 的值。对同一块太阳电池板，编写出在相同温度条件下夜间的 PSpice 代码。绘制出伏安特性的半对数曲线（log$I$vs. V）（注意这个曲线在大电流时是非线性的）。列出该曲线的 V 值，令其电流值与前面列表中的 I_{sc} 近似相同。并证明串联电阻值可由 $(V-V_{oc})/I_{sc}$ 给出。

3.3　另外一种用于测量太阳电池串联电阻大小的方法，是基于在相同温度条件下对两个不同光照强度下太阳电池的两组伏安特性曲线的测量得出的。提出这个问题的目的就是来演示这种方法。

首先编写一段具有如下参数的太阳电池的 PSpice 代码：$J_{sc}=0.0343\text{A/cm}^2$，$j_{01}=1\times10^{-11}\text{A/cm}^2$，$j_{02}=0$，$r_{sh}=1\times10^6\Omega$，Area = 126.6cm² 以及 $r_s=0.05\Omega$。分

别绘制出在光照强度为 600W/m^2 和 1000W/m^{2}时的伏安特性曲线，用光标在光照强度为 1000W/m^{2}的曲线上找到 $I_{sc1}-1A$ 的点，并且找到在这个点处所对应的电压值，命名为 V_1。

用同样的方法，在光照强度为 600W/m^{2}的曲线上，找到电流为 $I=I_{sc2}-1A$ 的点所对应的电压 V_2 的值，并证明串联电阻值 R_s 可以用（V_2-V_1)/($I_{sc1}-I_{sc2}$）来表示。

参 考 文 献

[3.1] Van Overstraeten, R.J. and Mertens, R.P. *Physics Technology and Use of Photovoltaics*, Adam Hilgher, 1986.

[3.2] Green, M.A., *Solar Cells*, Bridge Printery, Rosebery, NSW, Australia, 1992.

[3.3] Anspaugh, B.E., *Solar Cell Radiation Handbook, Addendum 1*, NASA Jet Propulsion Laboratory publication JPL 82-69, 15 February, Pasadena, California, 1989, Figures 1, 2, 3, 21, 22 and 23.

第 4 章　太阳电池阵列、PV 模块和 PV 发电组件

摘要：本章主要介绍了太阳电池如何通过组合而形成阵列、PV 标准模块以及 PV 发电组件。首先讲述的是太阳电池的串联特性与并联特性，然后阐明旁路二极管的作用。在本章中，还介绍了 PV 模块在标准特性与任意光照强度和温度条件下的转换。将更为普遍的模型或者 PSpice 的行为模型应用于 PV 模块和 PV 发电组件，从而扩展了第 3 章中的太阳电池模型。

4.1　介绍

正如第 2 章所示，由于开路电压不是依赖于太阳电池的面积而是受限于半导体特性，所以用单个的太阳电池提供高电压受到了限制。在绝大多数光电应用中，要求电压高于数十伏特，即使对于常规的电子设备，现在通常也需要至少 1V 左右的电压。所以必须把太阳电池串联，来增加 PV 发电电压。本章将会讲述太阳电池串联的一些特殊性能。

PV 应用可从几瓦的便携式设备到兆瓦级的 PV 发电站，因此 PV 发电不仅要提高电压还要增大电流。由于最大太阳电池面积受到生产和组装工艺的限制，这就意味着，考虑到所有系统组件和损耗后，PV 电池与 PV 模块的并联被广泛应用来满足一个给定的 PV 设备的输出电流。

4.2　太阳电池串联

图 4-1 是两个太阳电池串联连接的原理图。按照不同电池的照度水平或其不同的内部参数可以划分为几种情况。

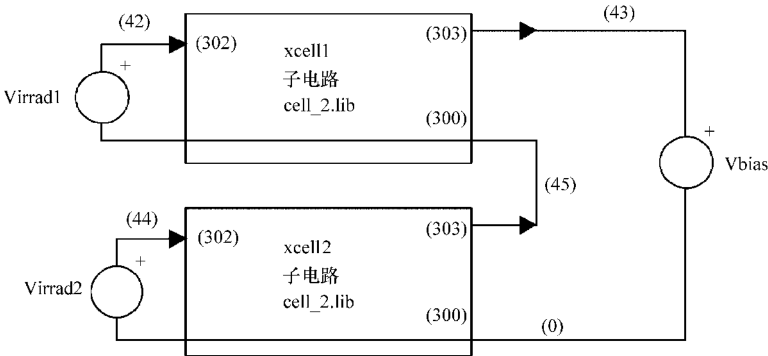


图 4-1　两个太阳电池的串联

4.2.1 相同的太阳电池组合

上图 4-1 所示的两个太阳电池串联相对应的网表如下所示：

```
*SERIES.CIR
.include cell_2.lib
xcell1 45 43 42 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell2 0 45 44 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000

vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 45 dc 1000
virrad2 44 0 dc 1000

.dc vbias 0 1.2 0.01
.probe
.plot dc i(vbias)
.end
```

如图 4-1 所示，由于两块电池具有相同的辐射度，故其也具有相同的短路电流，并且其串、并联电阻也相同。然后得出串联后伏安特性曲线，其中短路电流等于二者中任意一个太阳电池的短路电流，开路电压是一个太阳电池的两倍。节点（43）与节点（0）之间是阵列输出，节点（45）是两个电池的公共节点，仿真结果如图 4-2 所示。

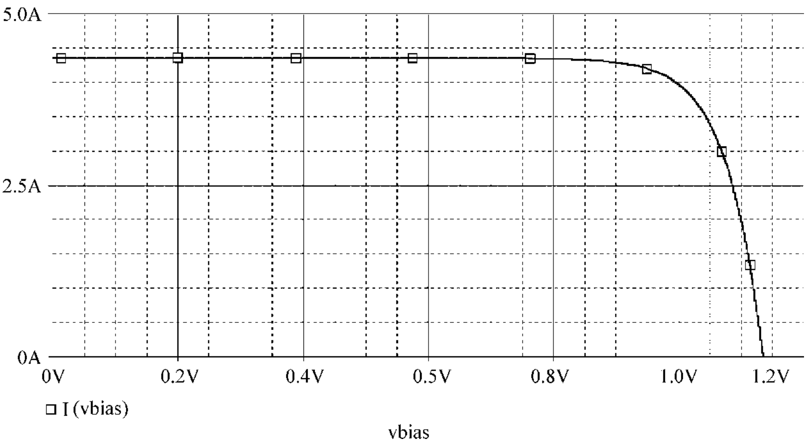


图 4-2　两个相同太阳电池串联的电流伏安特性曲线

4.2.2 相同的太阳电池在不同光照条件下的组合：热斑问题

假设两个太阳电池串联，但受到的光照强度不同。这是一种很常见的情况，比如其中一块太阳电池板上有脏污。修改前述的网表使第二块太阳电池接收 700W/m^2的光照，而第一块电池接收 1000W/m^2光照。这可通过修改代表第二个电池光照强度的电压源的值来实现。

```
virrad2 44 0 dc 700
```

图 4-3 中所示的曲线显示了这个仿真结果。如图所示，可以期望两个串联电池产生的短路电流等于被较少光照照射的太阳电池产生的短路电流［即 0.0343 ×（700/1000）×126.6 = 3.03A］。另外当电池在电压小于开路电压工作时，两个电池的电压降并不相等。这在图 4-3 中可清楚地看到，图中分别绘制了两个电池的电压降。正如所见，例如在短路点，第一个电池的电压降是 533mV，而第二个电池的电压降是 －533mV，以保证串联组的总压降为 0V。

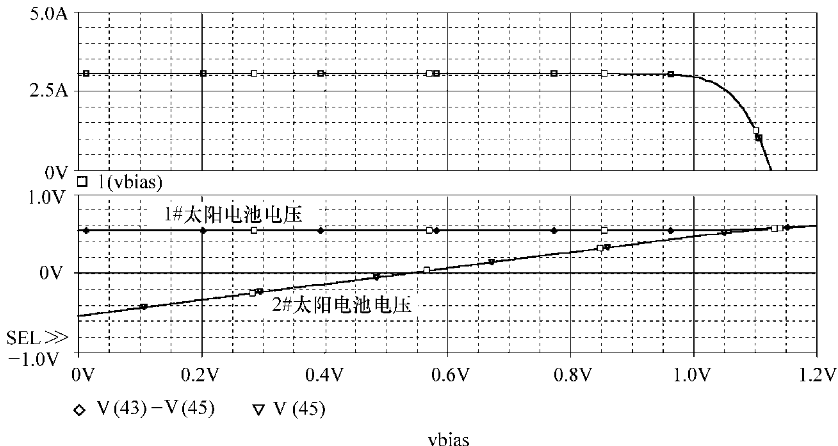


图 4-3　两个串联太阳电池

注：其中，1#光照强度为 1000W/m²，2#光照强度为 700W/m² 的伏安特性曲线。

这就意味着在某种条件下，光照较少的太阳电池很可能工作在反向偏置区，这会产生相应的后果。图 4-4 不仅给出了两个电池串联所输出的功率，还给出了每一个电池各自发出的功率。

从图中可以看到，如果串联电池组工作电压在 0.5V 以下，受光照较少的 2#太阳电池传送的功率可能是负的。这就表示 1#太阳电池所产生功率的一部分被 2#太阳电池消耗了，这就减少了有效的输出功率，并增加了 2#太阳电池的局部温度。

这就是“热斑”问题。当在一组串联电池的 PV 模块中只有一个电池受光照较少时，它将不得不消耗一部分由其他电池产生的功率。这时“热斑”问题就很重要。本章后面将把有关这个问题的分析扩展到 PV 模块。

4.2.3　串联太阳电池中的旁路二极管

如上所述，串联太阳电池供出的电流受到该串联电池组中光照较少的太阳电池的限制。这种特性可以推广到有一块电池被完全遮蔽或是完全损坏的情况，即该电池处于开路状态，这样整个串联电池组就处于开路状态。这种问题可以通过在每一块太阳电池或部分太阳电池串的两端并联旁路二极管来解决。这将在下面的例子中

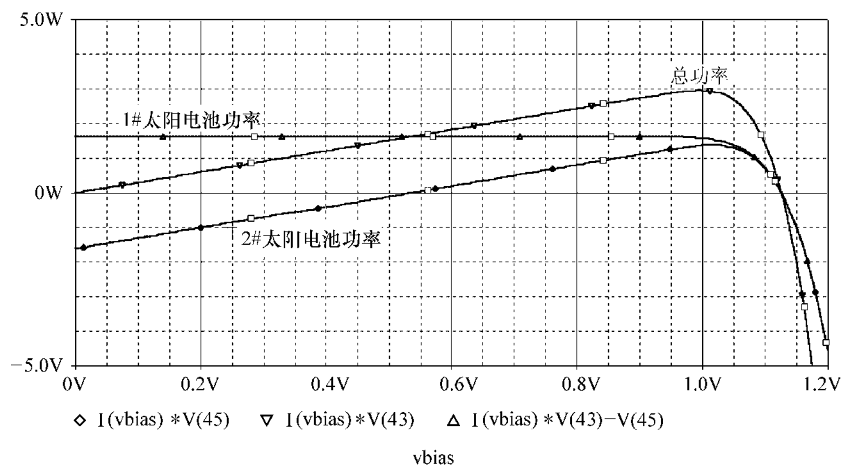


图 4-4　图 4-3 中的串联太阳电池在每块电池接收不同光照强度下输出的功率（正）、消耗的功率（负）以及总功率与串联总电压的关系曲线

加以说明。

例 4.1　假设有 12 块太阳电池串联，其中 6#电池被完全遮蔽。为了避免完全损失该串联太阳电池组所产生的功率，在故障太阳电池两端并联一个反向二极管，如图 4-5 所示。

画出最终的伏安特性曲线、旁路二极管的电压降以及功率损耗曲线。

相应的网表示于附录 D 的文件“bypass. cir”中。

旁路二极管接在电池串的节点（53）和节点（55）间。其结果如图 4-6 所示，图中对两组串联太阳电池阵列的伏安特性曲线进行了比较：第一组是 12 块太阳电池均接收 1000W/m^{2}的光照强度，第二组是同样的太阳电池阵列接收同样的光照，但 6#电池完全遮蔽，并且加旁路二极管。从图中可以看到第二组总的串联电压大约是 5. 5V，而不是 7V 左右。

图 4-7 显示了旁路二极管的电压，在 0. 871V ~ －0. 532V，与之相应的功率损耗基本上为 3. 74W。由这两条曲线可以得到对此二极管的评价要求。

可以得到结论：当一块电池处于阴影时，在其上并联旁路二极管可使阵列正常工作，代价是其工作电压降低。

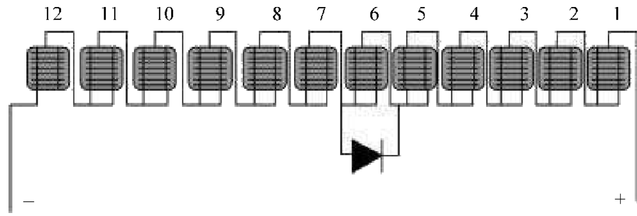


图 4-5　12 块太阳电池串联阵列，其中 6#电池并联旁路二极管

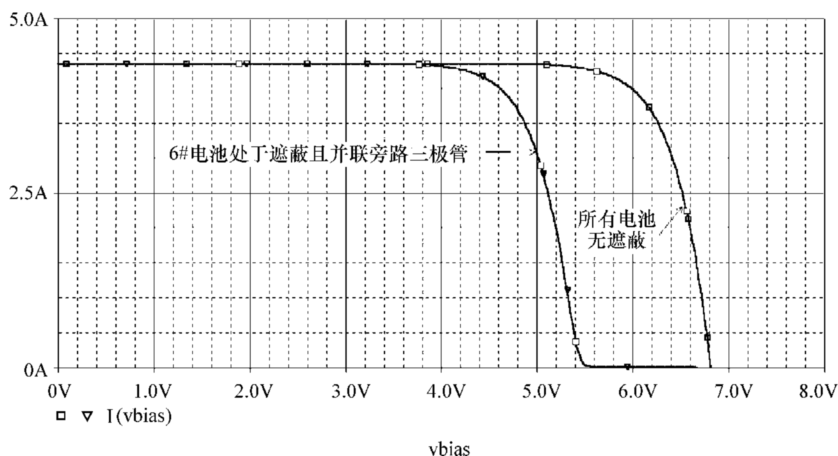


图 4-6 串联阵列中处于遮蔽下的太阳电池的旁路二极管的作用

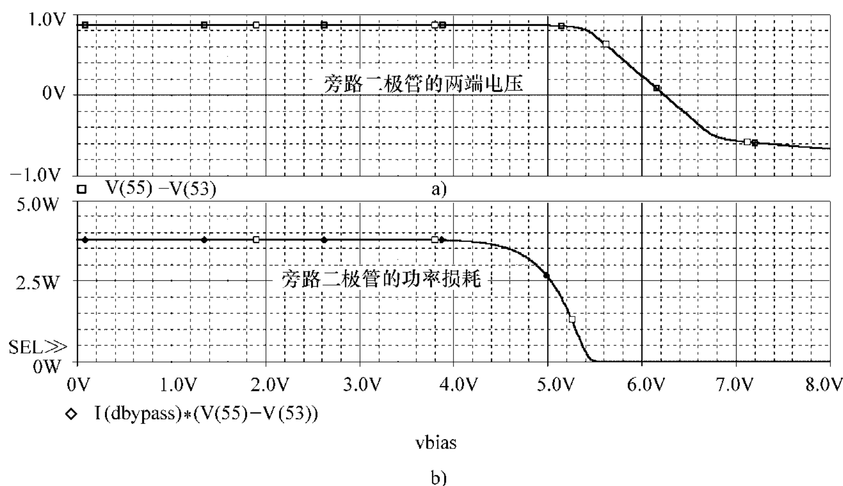


图 4-7 a）旁路二极管的两端电压 b）功率损耗

4.3 太阳电池的并联

在前述章节我们已经了解到可以通过串联太阳电池来提升 PV 阵列的电压。如果要增加 PV 阵列的输出电流，可以增大电池的面积，也可以把具有给定面积的电池相并联，而更为常见的做法是把多个串联的电池组相并联。这种方法被广泛应用于大的太阳电池阵列中，比如在太空中的应用和地球上大的 PV 组件和 PV 发电站。

两组相同的太阳电池并联的网表如图 4-8 所示，图中节点（43）和节点（0）是两个电池组的公共节点，节点（42）与节点（44）分别用来设置各自的光照强度。

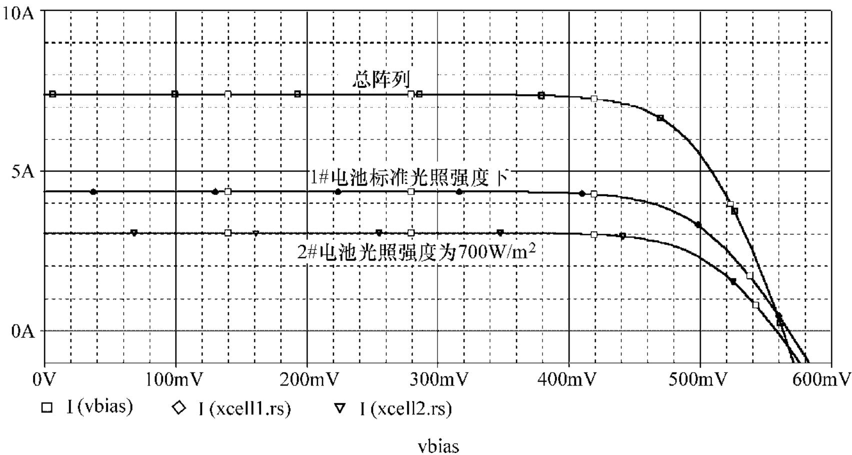


图 4-8　光照强度不同的两块太阳电池并联伏安特性曲线

注：标准光照强度指 1 倍太阳光强，在 AM1.5G 的大气因子下，光强为 $1000W/m^2$。

```
*shunt.cir
.include cell_2.lib
xcell1 0 43 42 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-2 rsh=1000
xcell2 0 43 44 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-2 rsh=1000

vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 0 dc 1000
virrad2 44 0 dc 700
.plot dc i(vbias)

.dc vbias 0 0.6 0.01
.probe
.end
```

图 4-8 所示为两个并联的太阳电池分别接收 $1000W/m^2$ 和 $700W/m^2$ 的光照强度时的伏安特性曲线，从图中可以看出，总的短路电流是两个电池的短路电流之和。

阴影遮蔽的影响

上面的分析并不能说明两个并联的太阳电池串在 50% 的光照下所产生的功率与单个太阳电池串在 100% 光照下所产生的功率正好相等。这是因为存在串联电阻与并联电阻的功耗。下面的例子就说明了这种情况。

例 4.2　假设两块相同的太阳电池相并联，具有以下参数：

$R_{sh}=100\Omega$，$R_s=0.5\Omega$，$Area=8cm^2$，$J_0=1\times10^{-11}A/cm^2$，$J_{sc}=0.0343A/cm^2$

比较以下两种情况下，这种小型 PV 模块的最大输出功率：A）两块电池均置于半遮蔽状态，即得到 $500W/m^2$ 的光照；B）一块电池被完全遮蔽，另一块接收 100% 的光照，即 $1000W/m^2$。

使用上面的网表来分析该问题，依次用 A 和 B 两种情况下给出的数值来替代光照强度。该网表文件可参见附录 D 下的 “example4 - 2. cir” 和 “example4 - 2b. cir”。

仿真结果如图 4-9 所示。

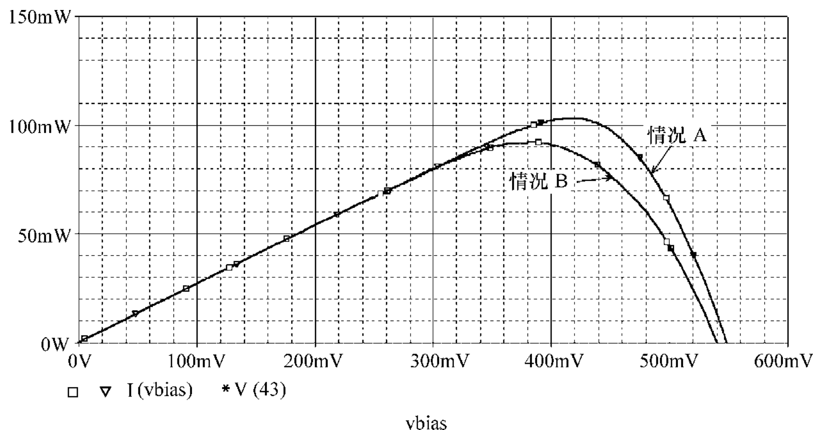


图 4-9　例 4. 2 的解答

为了增大差异，故意把并联电阻值选的很低。可以看出两组开路电压和最大功率都不相同。这就表明：简单地忽略被完全遮蔽的太阳电池不能获得精确的结果，因为这样没有考虑寄生电阻引起的相关损耗。

4. 4　地面 PV 模块

太阳电池的串联组是常用的 PV 模块。在地面应用中，PV 标准模块是由多块太阳电池串联组成的，数目通常在 33 ~ 36 块，当然也存在其他的连接方式。电池间使用金属条连接。PV 模块的特性就是一块太阳电池的伏安特性电压放大的结果。在 PSpice 中很容易把例 4. 1 中所描述的方法拓广应用于扩展后的串联电池组模型。

然而，我们需要一个更为简洁的 PV 模块模型，有两个主要的原因：第一个原因是随着串联太阳电池数目的增多，电路的节点也增多。而通常教育和评估版本的 PSpice 不支持多于一定数量节点的电路仿真。第二个原因是，电流与电压的扩展规则均为大家所熟知且普遍适用。那么在这些规则的基础上建立一个更简洁的模型会更简便实用。它可以作为单块 PV 组件的模型使用，然后扩展应用到太阳能发电站。单块太阳电池的伏安特性如下：

$$I = I_L - I_0\left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1\right) - I_{02}\left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (4\text{-}1)$$

让我们做一些简化的假设，特别假设太阳电池的并联电阻 R_{sh} 很大，其作用可被忽略。且假设第二个二极管的作用也可以被忽略，即 $I_{02}=0$，$R_{sh}=\infty$，则式（4-1）可简化成

$$I = I_{sc} - I_0\left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1\right) \tag{4-2}$$

在这里同样假设 $I_L = I_{sc}$。

当考虑 $N_s \times N_p$ 矩阵的太阳电池时，电压、电流和电阻的扩展规则如下所示：

$$I_M = N_p I \tag{4-3}$$

$$I_{scM} = N_p I_{sc} \tag{4-4}$$

$$V_M = N_s V \tag{4-5}$$

$$V_{ocM} = N_s V_{oc} \tag{4-6}$$

这里下标 M 代表"模块"，无 M 下标的代表单块的太阳电池。串联电阻的扩展规则与 $N_s \times N_p$ 的电阻矩阵一样：

$$R_{sM} = \frac{N_s}{N_p}R_s \tag{4-7}$$

代入式（4-2）中可得：

$$\frac{I_M}{N_p} = \frac{I_{scM}}{N_p} - I_{01}\left(e^{\frac{\frac{V_M}{N_s}+\frac{I_M N_p}{N_p N_s}R_{sM}}{nV_T}} - 1\right) \tag{4-8}$$

$$I_M = I_{scM} - N_p I_{01}\left(e^{\frac{V_M + I_M R_{sM}}{nN_s V_T}} - 1\right) \tag{4-9}$$

此外，由式（4-2）在开路的情况下可得：

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}} - 1\right)} \tag{4-10}$$

再联立式（4-4）和式（4-6），可得

$$I_0 = \frac{I_{scM}}{N_p\left(e^{\frac{V_{ocM}}{nV_T N_s}} - 1\right)} \tag{4-11}$$

式（4-11）是非常有用的，因为在通常情况下，一个 PV 模块的电气参数值是已知的（如 I_{scM} 和 V_{ocM}），而不像物理参数，如 I_0 是未知的。事实上 I_0 的值可以用开路电压与短路电流的值在 PSpice 内编写代码计算出来，如下所示。把式（4-11）代入式（4-9）则：

$$I_M = I_{scM} - I_{scM}\frac{\left(e^{\frac{V_M + I_M R_{sM}}{nV_T N_s}} - 1\right)}{\left(e^{\frac{V_{ocM}}{nV_T N_s}} - 1\right)} \tag{4-12}$$

忽略两个括号内的常数 1：

$$I_M = I_{scM}\left(1 - e^{\frac{V_M + I_M R_{sM} - V_{ocM}}{nV_T N_s}}\right) \tag{4-13}$$

式（4-13）是 PV 模块伏安特性的一个非常简单的表达式，特别适用于笔算。

另一方面 PV 模块的串联电阻值在商业技术手册中通常不会给出。而最大功率值要么直接给出，要么可以通过转换效率简单地计算得出。通常 P_{max} 是在标准条件下得到的，由此模块串联电阻值可以利用 3.13 节和例 3.5 中所用的方法计算出来。要计算模块的串联电阻值，就需要知道串联电阻为 0 时 PV 模块的填充因子值。假定由相同的太阳电池串联而成的太阳模块的填充因子等于单块太阳电池的填充因子。这可由式（4-3）～式（4-7）所示的扩展规则得到：

$$FF_{0M} = \frac{J_{mM}V_{mM}}{J_{scM}V_{ocM}} = \frac{J_m V_m}{J_{sc}V_{oc}} = FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \tag{4-14}$$

这里 v_{oc} 的归一化值可以通过单块太阳电池或 PV 模块的数据计算出来：

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nV_T} = \frac{V_{ocM}}{N_s n V_T} \tag{4-15}$$

串联电阻值可由最大功率点处单位面积的功率密度计算出来：

$$P_{maxM} = FF_M V_{ocM} J_{scM} = FF_{0M}(1 - r_{sM}) V_{ocM} J_{scM} \tag{4-16}$$

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{maxM}}{FF_{0M} I_{scM}^2} \tag{4-17}$$

式（4-9）与式（4-10）给出了 PV 模块伏安特性的基本方程，可转化成如下 PSpice 代码，图 4-10 为相应的原理图。

```
.subckt module_1 400 403 402 params:ta=1, tr=1, iscmr=1, pmaxmr=1,
+vocmr  1,
+ns=1, np=1, nd=1
girradm 400 401 value={(iscm/1000*v(402))}
d1 401 400 diode
.model diode d(is={iscm/(np*exp(vocm/(nd*ns*(8.66e-
+5*(tr-273)))))},n={nd*ns})
.func uvet() {8.66e-5*(tr+273)}
.func vocnorm() {vocm/(nd*ns*uvet)}
.func rsm() {vocm/(iscm) - pmaxm*(1+vocnorm)/(iscm**2*(vocnorm-
+log((vocnorm)+0.72)))}
rs 401 403 {rsm()}
.ends module_1
```

为了避免与内部的 PSpice 理想因子重复，这里二极管因子被命名为 nd。上面网表中包含了一个商用 PV 模块的实际值，如下所示：

$$N_s = 36, P_{max} = 85W, I_{scm} = 5A, V_{ocm} = 22.3V$$

由式（4-15）与式（4-17）可计算出 PV 模块总的串联电阻值为 0.368Ω。由 PSpice 仿真获得的伏安特性曲线如图 4-11 所示。其仿真文件“module.cir”如下：

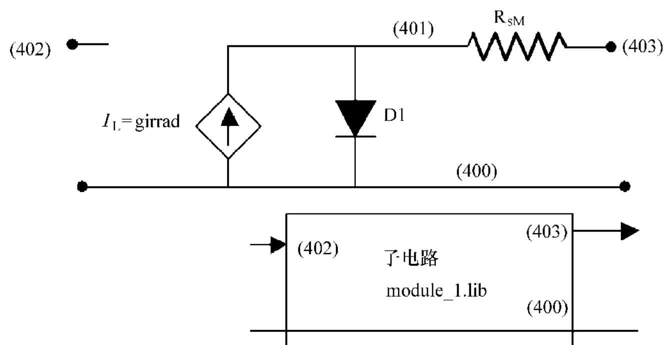


图 4-10　PV 模块子电路的 PSpice 模型

```
*module_1.cir
.include module_1.lib
xmodule 0 43 42 module_1 params:ta-25,tr-25, iscm-5, pmaxm-85, vocm-22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
vbias 43 0 dc 0
virrad 42 0 dc 1000
.dc vbias 0 23 0.1
.probe
.end
```

从 PSpice 仿真得出的最大功率是 84.53W，而不是额定的 85W（误差小于 0.6%）。

根据商用 PV 模块提供的主要 PV 参数：短路电流、开路电压、最大功率和太阳电池的连接数目，本节所介绍的 PV 模型可用来生成标准 AM1.5G 条件下 PV 模块的伏安特性。然而，我们同样面临第 3 章中所涉及的单块太阳电池的问题，即怎样将 PV 模块的标准特性转化为任意光照和温度条件下的特性。下一节将会介绍一些模型来解决这个问题。

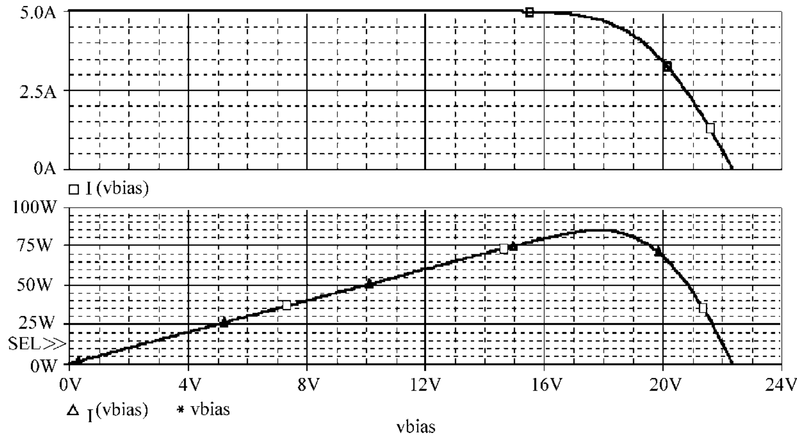


图 4-11　伏安特性曲线图和输出最大功率为 85W 的 PV 模块的功率曲线图

4.5　PV 模块的标准特性与任意光照和温度条件下特性的转化

标称的 PV 模块电气特性是在标准的光照强度与温度下得到的。对于地面应用而言，其标准条件为 AM1.5 的光谱，即电池温度为 25℃ 时太阳总辐照度为 $1000W/m^2$；而对空间应用其标准条件是 AM0，即在 25℃ 时，太阳总辐照度为 $1353W/m^2$。但是使用者所知的是 PV 模块电气参数的标称值，在工作条件改变时这些参数值就会发生改变。当从一种工作条件改变成另一种工作条件时，PV 模块的特性如何转化是设计者和使用者面临的一个问题，他们想知道 PV 装置在实际的平均条件下的输出而不是标准条件下的输出。但标准条件输出只能在专业实验室得到。

多数转换方法都基于第 3 章所讲述的原理，将其中重要的几点总结如下：

1）短路电流与光照强度成正比，并且存在一个小的温度系数；

2）开路电压为负的温度系数，并且与光照强度的对数有关。

此外，由于封装、热对流和光照强度的原因，环境温度与电池工作温度有很大的差别。

基于归一化变量的转化，ISPRA（伊斯普拉）**算法**

这一节将给出一个 PSpice 模型，该模型是基于 G. Blansser 在长期观测经验的基础上得出的转换方法建立的。该方法是按照下列公式，将每一对（I，V）坐标对与给定的参照条件下的（I_r，V_r）坐标对相互转换：

$$I_r = I\frac{G}{G_r} \tag{4-18}$$

$$V_r = V + DV \tag{4-19}$$

不考虑电流温度系数，而将温度效应用参数 DV 来表示，定义如下：

$$DV = V_{ocr} + V_{oc} \tag{4-20}$$

为了方便把电流和电压值归一化，如下：

$$i_r = \frac{I_r}{I_{scr}} \qquad i = \frac{I}{I_{sc}} \tag{4-21}$$

$$v_r = \frac{V_r}{V_{ocr}} \qquad v = \frac{V}{V_{oc}} \tag{4-22}$$

于是就得到了这些归一化的变量之间的简单关系：

$$i_r = i \tag{4-23}$$

$$v = \frac{v_r - Dv}{1 - Dv} \tag{4-24}$$

这里

$$Dv = \frac{DV}{V_{ocr}} \tag{4-25}$$

式（4-23）和式（4-24）分别是电流和电压的转化方程。结合前面的定义，填充因子的转化可由下式给出。

$$\mathrm{FF} = \mathrm{FF}_{\mathrm{r}} \frac{v_{\mathrm{mr}} - \mathrm{Dv}}{v_{\mathrm{mr}}(1 - \mathrm{Dv})} \tag{4-26}$$

由此可见，Dv 是一个重要的参数。晶体硅 PV 模块的 Dv 值已由多种实验方法测得，可由以下公式确定：

$$\mathrm{Dv} = 0.06\ln \frac{G_{\mathrm{r}}}{G} + 0.004(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{r}}) + 0.12 \times 10^{-3} G \tag{4-27}$$

这里 T_{a}是环境温度，T_{r}是电池在标准情况下的工作温度，即 25℃。这样就如下面的例子一样，任何转换都可进行。

例 4.3　考虑标准条件（带下标 r）下商用 PV 模块的如下特性：

$$N_{\mathrm{s}} = 36,\ P_{\mathrm{maxr}} = 85\mathrm{W},\ I_{\mathrm{scmr}} = 5\mathrm{A},\ V_{\mathrm{ocmr}} = 22.3\mathrm{V}$$

计算并绘制出该 PV 模块在标准工作条件（$G = 800\mathrm{W/m^2}$，$T_{\mathrm{a}} = 25℃$）下的伏安特性，在附录 D 中给出了它的网表文件“module_ conv. cir”。

电压坐标转换部分已经被添加到在标准温度和新的光照条件下计算 PV 模块特性部分。式（4-19）的电压变换通过减去一个值为 DV 的直流电压源得到，具体可参见 4-12 的原理图。

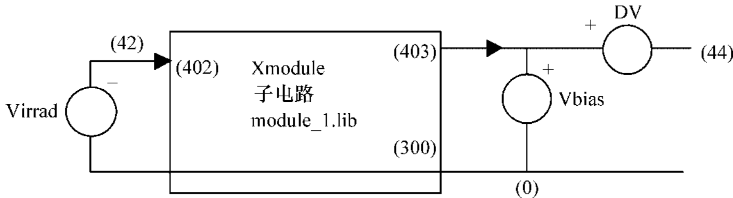


图 4-12　用基于 DV 参数的方法实现伏安特性转换电路

在环境温度为 25℃时，由 PSpice 得到的相应的仿真结果如下：

$$V_{\mathrm{oc}} = 19.71\mathrm{V}$$
$$I_{\mathrm{sc}} = 4\mathrm{A}$$
$$P_{\max} = 58.96\mathrm{W}$$

4.6　单个 PV 模块的 PSpice 行为模型

在 PV 模块的伏安特性从一组条件到另一组条件的转换中，NOCT（电池额定工作温度）的概念也是非常有用的，这和第 3 章中所述对单个太阳电池所使用的方法相同。谨记 NOTC 代表电池标称工作温度，即环境温度为 20℃，风速为 1m/s，电池背面打开且暴露在风中，光照强度为 800W/m² 的情况下电池的实际温度。这个参数有助于将环境温度与电池的实际工作温度联系起来。一个简单的常用经验公

式如下[4.2]：

$$T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{a}}=\frac{\mathrm{NOCT}-20}{800}G \tag{4-28}$$

这里 G 是光照强度，单位为 W/m^2，温度的单位为℃。当然 NOCT 的最终结果依赖于模块类型和封装材料。经过对很多 PV 模块的一系列测试之后，得到式（4-28）的通用公式，如下：

$$T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{a}}=0.035G \tag{4-29}$$

对应于 NOCT = 48℃。

式（4-28）也可以用来转换伏安特性，通过在前面的 PV 模块的方程中使用新的电池温度值实现。在任意光照与温度下，短路电流如下所示：

$$I_{\mathrm{scM}}=\frac{I_{\mathrm{scMr}}}{1000}G+\left(\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{scM}}}{\mathrm{d}T}\right)(T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{r}}) \tag{4-30}$$

根据第 3 章推导式（3.72）的方法可以得到开路电压方程，如下：

$$V_{\mathrm{ocM}}\approx V_{\mathrm{ocMr}}+\left(\frac{\partial V_{\mathrm{ocM}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{G}}(T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{r}})+V_{\mathrm{T}}\ln\frac{I_{\mathrm{scM}}}{I_{\mathrm{scMr}}} \tag{4-31}$$

用最大功率值，由式（4-17）可以计算获得模块串联电阻值。

与第 3 章所述一样，PV 制造商所提供的模块数据一般仅限于在标准条件（AM1.5G 1000W/m^2）下的短路电流、开路电压与最大功率点处的坐标。同样也会给出短路电流、开路电压的模块温度系数。第 3 章所讲述的单个太阳电池的 PSpice 行为模型可以推广到一个 PV 模块中，其最大功率点的坐标可由以下方程给出：

$$I_{\mathrm{mM}}=I_{\mathrm{mMr}}\frac{G}{G_{\mathrm{r}}}+\left(\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{scM}}}{\mathrm{d}T}\right)(T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{r}}) \tag{4-32}$$

$$V_{\mathrm{mM}}=N_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{T}}\ln\left[1+\frac{I_{\mathrm{scM}}-I_{\mathrm{mM}}}{I_{\mathrm{scM}}}\left(\mathrm{e}^{\frac{V_{\mathrm{ocM}}}{N_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{T}}}}-1\right)\right]-I_{\mathrm{mM}}R_{\mathrm{sM}} \tag{4-33}$$

首先定义一个 PV 模块（subckt module_ beh）行为模型的子电路。除了增加新的参数“ns”来描述串联太阳电池的数目外，很明显它与单个太阳电池子电路的定义相同。图 4-13 所示的子电路实现了 G－源“gidiode”中的式（4-13），以及模块的串联电阻值。

子电路的两个节点给出最大功率点的坐标值，它被用于 MPP 跟踪器。附录 D 中给出了其完整的网表文件“module_ deh. lib”。

例 4.4　用以下参数绘制 CIGS 太阳电池模块的伏安特性曲线：短路电流 0.37A，开路电压 21.0V，最大功率 5W，电压系数 −0.1V/℃，短路电流温度系数 +0.13mA/℃，这些数据来自于 www. siemenssolar. com 的 ST5 CIGS 太阳电池模块数据。

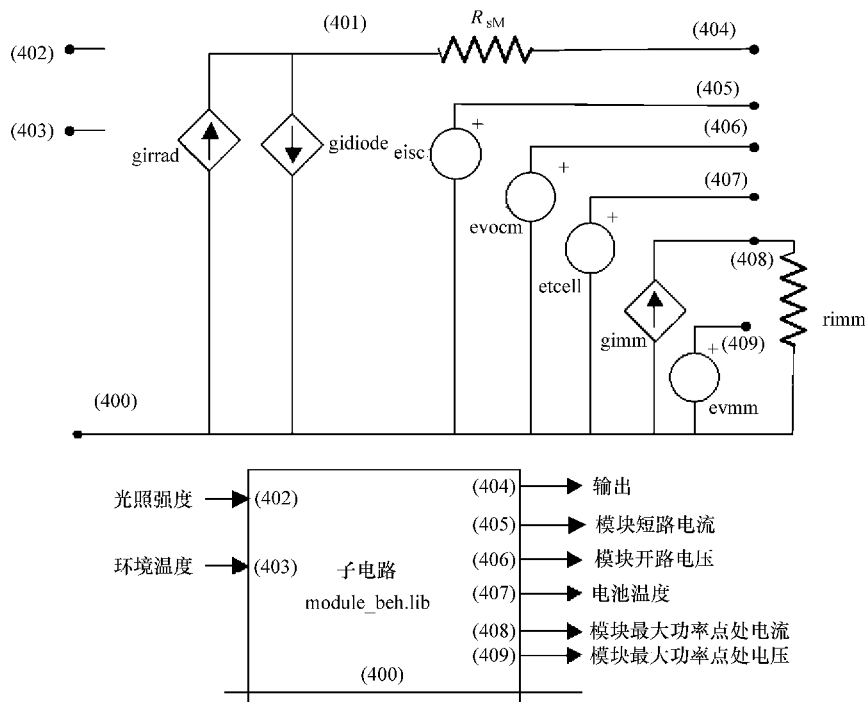


图 4-13　PV 模块行为模型子电路节点

解决方案

伏安特性的仿真文件如下所示：

```
*module_beh.cir
*   NODES
*   (0)    REFERENCE
*   (42) INPUT, IRRADIANCE
*   (43)    INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*   (44) OUTPUT
*   (45)    OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE  SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*   IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*   (46)    OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*   (47) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE = CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*   (48) OUTPUT, MPP CURRENT
*   (49) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.include module_beh.lib
xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr  0.37, coef_iscm  0.13e-3,
+ vocmr = 21, coef_vocm = -0.1,pmaxmr = 5,
+ noct - 47,immr - 0.32, vmmr - 15.6, tr - 25, ns - 33, np - 1
vbias 44 0 dc 0
virrad 42 0 dc 1000
vtemp 43 0 dc 25
.dc vbias 0 22 0.1
.probe
.end
```

结果显示：如果 NOCT = 20，光照强度为 1000W/m^2，能够得到很近似的最大功率点的坐标（大约 3% 的误差）。

作为反映电池温度影响重要性的例子，上面的模型已在两个 PV 模块上做了实验，一个是由晶体硅[4.3]制作的，另一个是由 CIGS 材质制成的[4.4]。在仿真中，环境温度保持 25℃不变，而光照强度从 0～1000W/m^{2}变化。在图 4-14 中绘制了最大功率点坐标值。

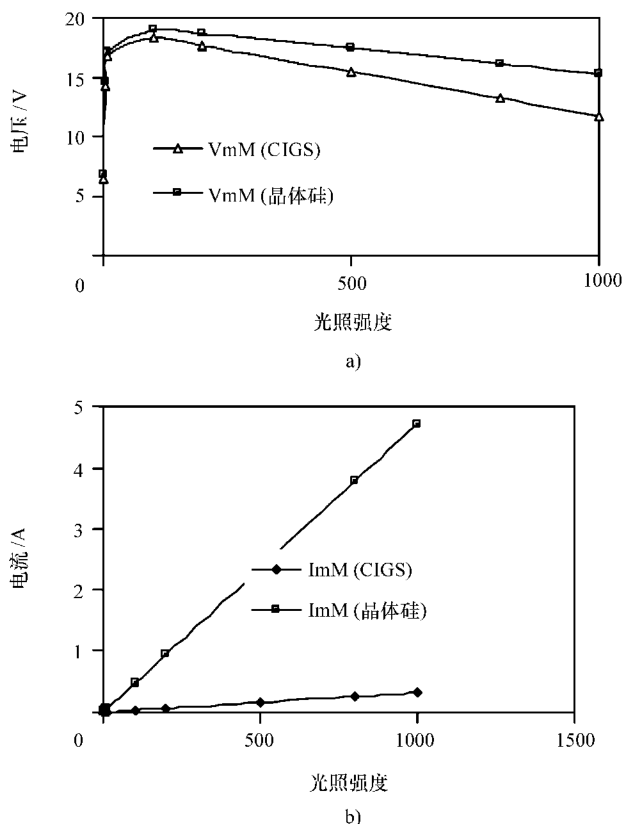


图 4-14　a）不同光照强度下最大功率点的电压值　b）最大功率点的电流值

由图可见，最大功率点处的电压在光照强度适中时有最大值。这就表明随光照增强而增加的最大功率点处电压的光照系数，受温度系数的补偿；而由于在较强光照下电池温度较高，温度系数反而会使最大功率点处的电压降低。

4.7　PV 模块中的热斑问题和安全操作区域

正如 4.2 节所讲的一样，处于阴影状态下的电池会强制性地消耗功率而不是产生功率。当 PV 模块中只有一块太阳电池被完全遮蔽时，这种功率消耗就显得极其

重要。它会增加该单块电池的工作温度。为此，通常要计算会造成该太阳电池或其封装材料永久性损坏的极端条件。计算单块太阳电池（第 n 块）的功率损耗是用来确定它的安全工作区（SOA）的方法之一，计算公式如下：

$$P_{\text{dis}} = -I_{\text{M}}V(n) \tag{4-34}$$

前提条件是，在任意条件下，第 n 块电池的功率损耗必须小于某一个特定限制 $P_{\text{dis max}}$。电压 $V(n)$ 由式（4-35）给出：

$$V(n) = V_{\text{M}} - \sum_{i=1}^{i=n-1} V(i) \tag{4-35}$$

由式（4-34）可得：

$$-I_{\text{M}}V_{\text{M}} + I_{\text{M}}\sum_{i=1}^{i=n-1} V(i) < P_{\text{dis max}} \tag{4-36}$$

并且

$$V_{\text{M}} > \sum_{i=1}^{i=n-1} V(i) - \frac{P_{\text{dis max}}}{I_{\text{M}}} \tag{4-37}$$

很容易画出式（4-37）的曲线。考虑到 $P_{\text{dis max}} = 25\text{W}$，对 4.4 节中仿真的商用太阳能模块的伏安特性曲线如图 4-15 所示。图中坐标轴已旋转 90°，即 y 轴是 PV 模块电压，x 轴是 PV 模块电流。

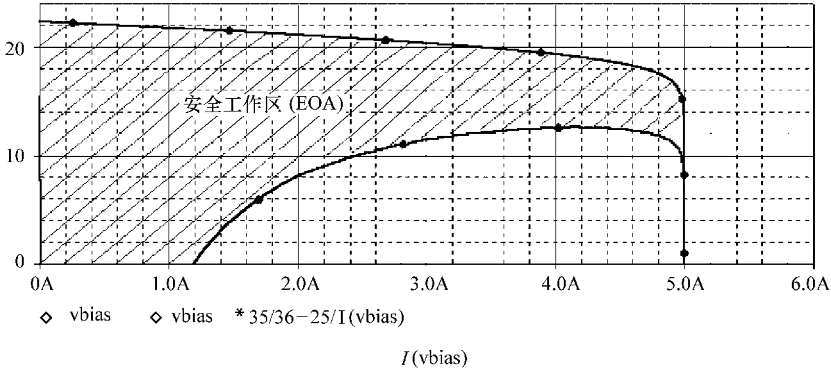


图 4-15　PV 模块的安全工作区（x 轴为电流；y 轴为电压）

在图 4-15 中再按下式绘制另一条曲线，则两个曲线之间是安全工作区。

$$V = \frac{35}{36}V_{\text{bias}} - \frac{25}{I(V_{\text{bias}})}$$

如果太阳电池工作在安全工作区以外，功率损耗就有可能超过限制值。

4.8　PV 阵列

PV 阵列，通常也叫 PV 发电板，由太阳电池或 PV 模块串并联而成。它最初应

用于外太空，PV 阵列是专为一个特定的航天卫星或航天站而设计的。在地面应用中，PV 阵列由 PV 模块连接而成，而每一个 PV 模块都是由一定数目的太阳电池串联后并联旁路二极管组成的。这节将集中介绍 PV 阵列在外太空中的应用，以阐明遮蔽的影响，关于地面应用的情况将在第 5 章中讨论。

通常外太空中的 PV 阵列由很多个并联的太阳电池组串联而成，如图 4-16 所示。

旁路二极管的作用和以前所讲的相同：即使太阳电池阵列中有一个太阳电池并联组被完全遮蔽，也能保证 PV 阵列的电流沿着正确的方向流动。为了说明这种结构的优点，将问题简化为 18 个太阳电池组成的阵列，并在例 4.5 中说明。该例中，共有 6 组模块串联，其中每一组模块由 3 个并联的太阳电池组成。

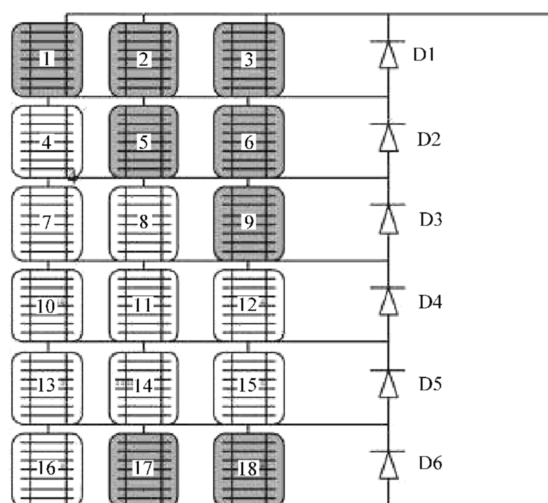


图 4-16　由 18 块带有旁路二极管的太阳电池组成的 PV 阵列模块

例 4.5　一个太空 PV 阵列由 18 块太阳电池按图 4-16 排列而成。每一块电池都有相同的参数：

$\text{Area}=8\text{cm}^2$，$J_0=1\times10^{-11}$，$J_{sc}=0.0343\text{A/cm}^2$，$R_{sh}=1000\Omega$，$R_s=0.1\Omega$

其中 8 块被涂黑的电池表示被完全遮蔽。

分别绘制完全没有被遮蔽和被遮蔽阵列的伏安特性曲线图；绘制出旁路二极管的电压降曲线和功率损耗曲线。

解决方案

假设处于遮蔽下的电池光照强度为 0，相应的网表只需在例 4.1 网表的基础上稍作更改，增加 6 个旁路二极管。文件见附录 D 中的“6x3_ array. cir”，结果如图 4-17 所示。

从仿真图中可以看到与未遮蔽时的曲线（上面的）相比，部分遮蔽时阵列的

伏安特性曲线严重恶化。如果没有旁路二极管，只要串联电池组中的任一个模块（电池 1 ~3）完全处于阴影之下，总的输出功率将会是 0。所以旁路二极管的作用是显而易见的。正是因为某些旁路二极管在阵列的某些工作电压范围内处于正向偏置，所以可以解释图示的伏安特性曲线。用上面的网表同样可以绘制各个旁路二极管的电压降曲线，如图 4-18 所示。

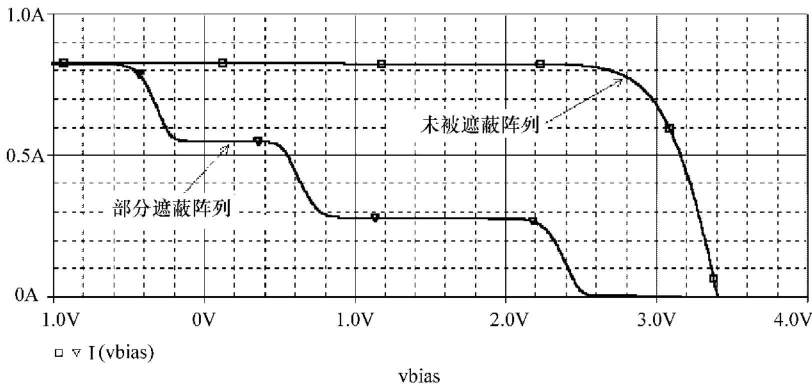


图 4-17　部分遮蔽阵列和未被遮蔽阵列的伏安特性曲线图

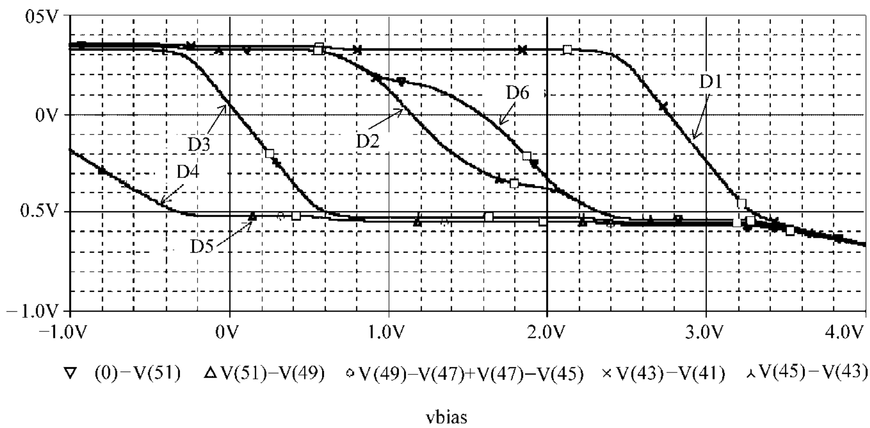


图 4-18　6 ×3 阵列中各个旁路二极管的电压降曲线

由图可见，在阵列工作电压范围（约 0 ~3.5V）内旁路二极管 D4 与 D5 保持反向偏压，而 D3、D1、D6 与 D2 在对应于遮蔽区的部分工作电压范围内正向导通，并且与阴影遮蔽的程度有关。这些二极管正向偏置时会消耗很多功率。一方面该计算有助于评定一个给定阵列的旁路二极管的选型是否合适，另外还可以通过伏安特性曲线的形状来进行故障元件的监测。

4.9　PV 发电组和 PV 发电站的扩展

太阳电池组的串联可用以建成各种地面应用的 PV 模块，以及在不能采用标准尺寸模块化或因其他原因无法直接使用标准模块时组成所需的 PV 阵列。例如人造卫星上的太阳电池阵列，或者集成在建筑物上的特殊尺寸的模块。

我们不考虑这些特殊的例子，因为它们所用的模型都是一般的太阳电池模型或 PV 系列模块。最常见的情况是 PV 发电组是由几个标准的 PV 地面模块以 $N_{sG}\times N_{pG}$矩阵的形式串并联组成的。而要把单个的 PV 模块特性与 PV 发电组或 PV 发电站的特性联系起来，需要考虑扩展规则。

在这里可以用 4.4 节所讲述的步骤把一个 PV 模块扩展到一个 PV 发电站。现在假设用于 PV 发电站的单元是一个 PV 模块，其伏安特性参数如下：

1）短路电流：I_{scM}；

2）开路电压：V_{ocM}；

3）最大功率：P_{maxM}；

4）MPP 点的电流：I_{mM}；

5）MPP 点的电压：V_{mM}；

6）短路电流、开路电压的温度系数。

建立一个 N_{sG}个模块串联和 N_{pG}个模块并联的矩阵 PV 发电组，则其伏安特性为：

$$I_G = N_{pG} I_M$$
$$V_G = N_{sG} V_M \tag{4-38}$$

这里脚标 G 代表发电组，脚标 M 代表 PV 模块。

将上述原则直接用于发电组可得到：

$$I_G = N_{pG} I_{scM} - \frac{N_{pG} I_{scM}}{e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}}} \left(e^{\frac{V_G + I_G R_{sM} \frac{N_{sG}}{N_{pG}}}{n N_s N_{sG} V_T}} - 1 \right) \tag{4-39}$$

这里除了模块串联电阻值需要用式（4-17）计算以外，其他参数值都可由单个 PV 模块参数得到，而这些参数均为已知的。使用二极管理想因子 $n=1$，如果有必要可以将它乘以 N_s 的值以考虑它的作用。

用与第 3 章中计算单个太阳电池最大功率点坐标或本章中计算单个模块最大功率点坐标同样的方法，可以计算任意串并联规模的 PV 发电组最大功率点的坐标，公式如下：

$$I_{mG} = N_{pG} \left[I_{mMr} \frac{G}{G_r} + \left(\frac{dI_{scM}}{dT} \right) (T_{cell} - T_r) \right] \tag{4-40}$$

$$V_{mG} = N_{sG} \left\{ N_s V_T \ln \left[1 + \frac{I_{scM} - I_{mM}}{I_{scM}} \left(e^{\frac{V_{ocM}}{N_s V_T}} - 1 \right) \right] - I_{mM} R_{sM} \right\} \tag{4-41}$$

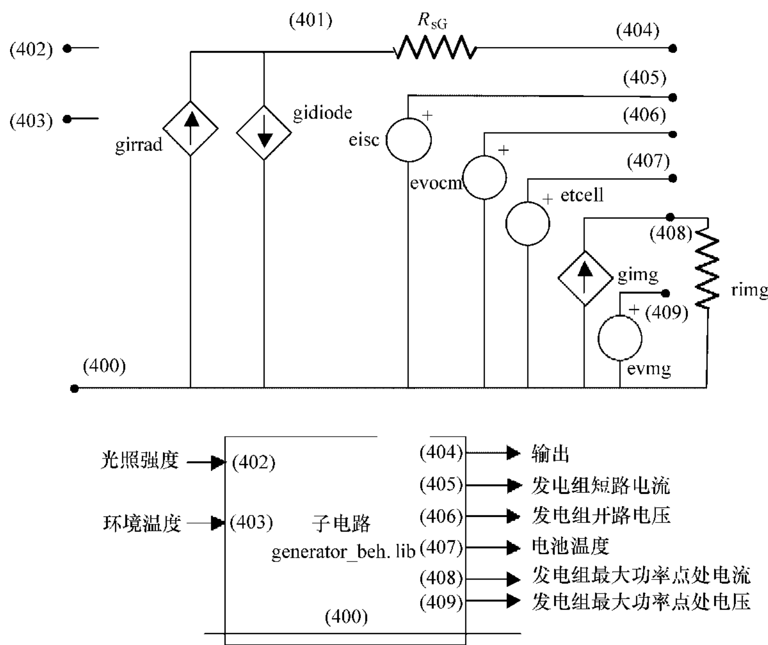


图 4-19　由 $N_{sG} \times N_{pG}$ PV 模块组成的 PV 发电组子电路

这里 V_{ocM} 的值由式（4-31）和下式给出：

$$I_{mM} = \frac{I_{mG}}{N_{pG}} \tag{4-42}$$

由式（4-38）~式（4-42）可以写出如图 4-19 所示的 PV 发电组子电路，它与模块子电路形式相同。

网表在附录 D 中，名为“generator_ beh. lib”。这里的分指数 g 用于表明发电组。文件“generator_ beh. cir”也在附录 D 中给出，它可以用来绘制 5×2 模块的发电组的伏安特性曲线，其图像与单个 PV 模块的电压和电流按照扩展规则扩展后的图像相同，这里不再给出。

4.10　习题

4.1　分别仿真一个由 33、34、35 和 36 块太阳电池串联的地面 PV 模块在标准情况（AM1.5，1000W/m^2，27℃的电池温度）下的伏安特性，并计算 V_{oc} 和 P_m 的值。假设设计要求为：在 22℃环境温度，400W/m^2 光照下开路电压必须大于 14V，以上哪个设计满足要求？

4.2　如图 4-5 所示，在 12 个太阳电池串联的阵列中，用两个旁路二极管代替一个。其中一个放在负端与太阳电池 3 和 4 的连接点之间，另一个放于 + 端和太阳

电池 9 与 10 连接点之间，绘制所有电池在标准条件且接收同等光照强度下的伏安特性图。分别绘制以下条件的伏安特性曲线：①电池 1 与 10 完全处于阴影下；②电池 1 与 2 完全处于阴影下；③电池 1 与 9 完全处于阴影下。

4.3 将 6 个电池串联组成的电池串的标准特性转化到不同条件下的特性，即光照 $800W/m^2$，环境温度 35℃。

参 考 文 献

[4.1] Blaesser, G., 'Use of I-V extrapolation methods in PV systems analysis' in *European PV Plant Monitoring Newsletter*, 9 November, pp. 4–5, Commission of the EU Communities, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 1993.

[4.2] Ross, R.G. and Smockler, M.I. '*Flat-Plate Solar Array Project Final Report, Volume VI: Engineering – Sciences and Reliability*, Jet Propulsion Laboratory, Publication 86–31, 1986.

[4.3] www.isofoton.es.

[4.4] www.siemenssolar.com.

第 5 章　PV 模块与负载和蓄电池连接的建模

摘要：PV 系统用于向负载提供直流和交流电。根据最终接入 PV 系统负载的复杂性和特性，PV 系统会包含不同的元件，这些不同的元件可以是：

1）直流负载，如直流灯，电动机；

2）蓄电池；

3）交流负载，如交流灯，家用电器，电子设备；

4）功率调节设备，如保护和控制器件，交流直流变换器，充电调压器，直流交流变换器。

由于负载的不同特性，意味着它们与 PV 系统的连接的复杂程度也不同；研究 PV 模块与 PV 系统其他元件的各种连接方式，是本章的主要目标。

5.1　直流负载直接连接到 PV 模块

最简单的 PV 系统与负载连接的例子就是如图 5-1 所示的将直流负载直接连接到 PV 模块的输出端。最简单的负载是一个电阻 R。

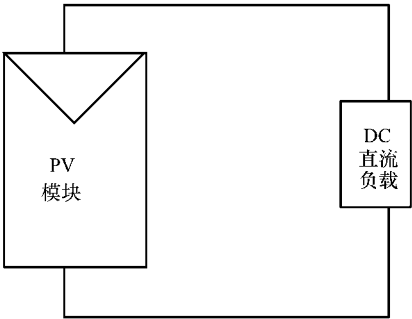


图 5-1　直流负载直接连接到 PV 模块

如果想知道工作点的坐标，需要找到负载和 PV 模块伏安特性曲线的交点。图 5-2 给出了开路电压为 22.1V，短路电流为 4A 的 PV 模块的伏安特性曲线。在这个例子中负载是一个 3Ω 的电阻，该图也给出了它在电压作用下的电流特性曲线，它是一条斜率为 1/R 的直线。

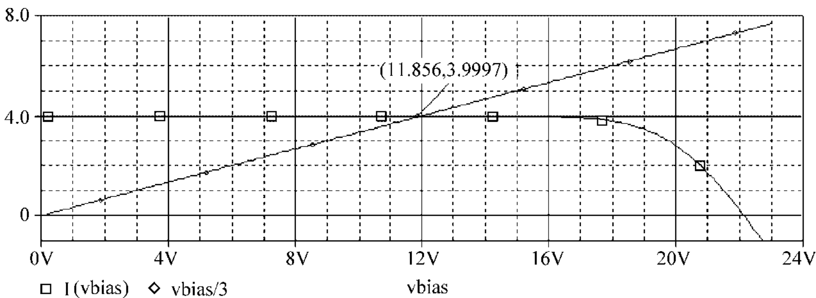


图 5-2　PV 模块和直流负载的伏安特性曲线

从图 5-2 可以看出，在辐射度和温度一定的情况下，两特性只有一个交点，由它决定电压、电流值。在该例中，流过负载的电流是 3.99A，负载端电压是 11.8V。在 PV 模块与电阻负载连接输出时，这是一个比较常见的电压值。

这个结果意味着，一个电阻负载决定了 PV 模块的工作点。通常，在扩展的 PV 系统中，电阻负载的工作点并不是它的最大功率点。因此可以认为，除非在 PV 系统和负载之间接入接口电路，否则通常在这种直连的方式中 PV 发电组件传送给负载的功率并不是最优的。

正如第 3、4 章中已经叙述过的，由于辐射度和温度的变化，PV 模块的伏安特性是随时间变化的，因此在 PV 系统和负载之间的接口电路是必需的。它将直接影响传输给负载的电功率。从这里分析的以电阻为负载的简单例子可知，负载和 PV 系统直接相连的结果就是，功率效率将随辐射度和温度的变化而变化。

PV 系统直接连接电阻的一个重要问题是夜晚时无法给负载传输功率，而在许多应用中夜晚能不能传输功率是一个关键的指标。

5.2　PV 水泵系统

PV 水泵系统通常是由 PV 发电组件直接与直流电动机连接去驱动一个水泵。合适的直流电动机和离心泵模型就可用于 PSpice 仿真。

5.2.1　直流串励电动机 PSpice 电路

在直流电动机中磁场是由永磁体或励磁绕组产生的。励磁绕组是一个带有绕组的转子。在电动机通电之后可以产生磁场以及机械转矩 τ_e。转矩 τ_e 与磁通 ϕ_m 和电枢电流 i_a 成正比，它们的关系如下：

$$\tau_e = K_\tau \phi_m i_a \tag{5-1}$$

式中，K_τ 是电动机转矩常数。同时在电枢绕组中感应产生了反电动势（emf），它与磁通以及角频率 ω 成正比，见式（5-2）。

$$E_{cm} = K_{cm} \phi_m \omega \tag{5-2}$$

在稳态下，不考虑损耗，机械功率（$\omega\tau_e$）和电功率（$v_a i_a$）是相等的，故有下式：

$$K_{cm} = K_\tau \tag{5-3}$$

如果磁场是由串励电动机的励磁绕组产生的，因磁场绕组和电枢绕组是串联的，而磁通又与励磁电流 i_f 成比例：

$$\phi = K_f i_f \tag{5-4}$$

因此可得到：

$$E_{cm} = K_{cm} K_f i_f \omega = K_m i_f \omega \tag{5-5}$$

$$\tau_e = K_\tau K_f i_f i_a = K_m i_f i_a \tag{5-6}$$

在直流串励电动机的动态等效电路中还应包含其他的成分：损耗电阻（R_a 和

R_f）、绕组电感（L_a 和 L_f）、惯性常量 J 和摩擦常量 F，以及机械负载转矩 τ_L 等，如图 5-3 所示。

反映直流电动机动态运行的微分方程是：

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_{cm}$$

$$V_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

$$\tau_e = J\frac{d\omega}{dt} + F\omega + \tau_L \qquad (5\text{-}7)$$

上面最后一个方程表示出机械量之间的关系，并由它决定角频率的值。

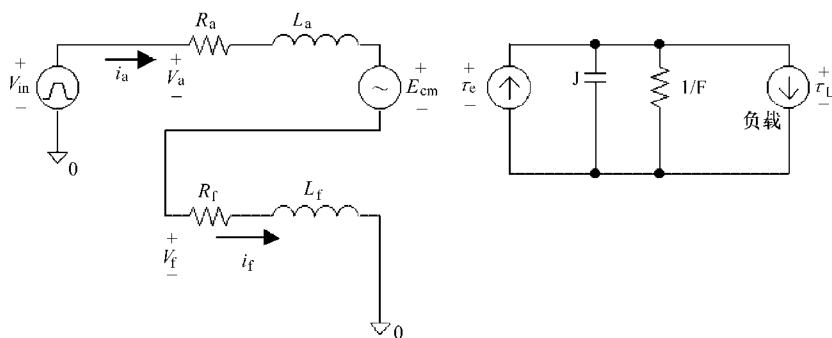


图 5-3　直流串励电动机带水泵负载的等效电路

以上方程都没有考虑磁心可能饱和的问题。如果考虑到这些因素的影响，PSpice 模型就会更加复杂。但是这些超出了本书要讨论的范围。读者可以参考参考文献［5.1］以对此有更深入的认识。

5.2.2　离心泵 PSpice 模型

当直流电动机连接到一个离心泵，一个负载转矩就连接到图 5-3 中等效电路的机械端口，它跟角频率有关：

$$\tau_L = A + B\omega^2 \qquad (5\text{-}8)$$

式中，A 和 B 是与泵自身特性有关系的常数。因此达到平衡时对于一个机械转矩就有一个与之对应的角速度。此外，离心泵的特性曲线与扬程 H、角频率以及流量 Q 有关。这些曲线可以从商用的技术说明手册或是网站上获取，它们通常都对应于一个给定的角速度。这些曲线可以通过如下的二次多项式来近似模拟：

$$H = A_1 S^2 + B_1 SQ + C_1 Q^2 \qquad (5\text{-}9)$$

式中，S 是角速度，单位为 r/min，A_1、B_1 和 C_1 对于选定的泵都是常数。

原理图 5-4 就说明了在一个直流电动机和泵连接的系统中不同参数之间的关系。

需要指出的是，由于电枢绕组等效电路中存在反电势 E_{cm}，因此输入功率是输出角速度的函数。也就是说图 5-4 的前两个功能方块与机械域的闭环反馈是紧密相关的。

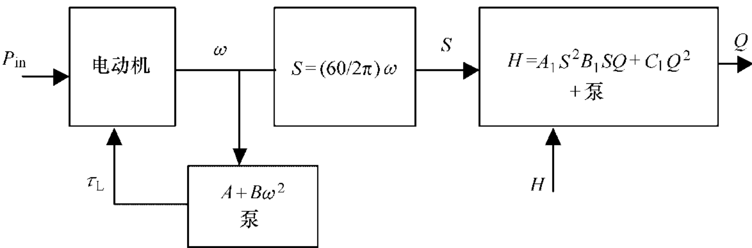


图 5-4　直流电动机和泵相连系统中不同参数之间的关系

5.2.3　参数提取

为了能给 PSpice 仿真提供正确的数据，需要提取式（5-1）~式（5-9）中的主要参数。首先提取泵的参数。泵的特性曲线的数据已经在表 5-1 中列出，表 5-1 为摘自参考文献［5.1］的生产厂家的数据。

表 5-1　参考文献［5.1］给出的生产厂家的数据

扬程 H/m	流量 Q/(L/s)	P_{in}功率/W
13.4	1	480
11.5	1.5	340
5	2.3	300

设定式（5-9）应用于转速 3000r/min 的特性曲线，可以得出 A_1、B_1 和 C_1 的数值如下：

$$A_1 = 1.35 \times 10^{-6}$$
$$B_1 = 0.0015$$
$$C_1 = -3.32$$

接下来，按照下面的步骤提取 K_m、A 和 B 的值。

步骤一

获取额定工作条件下的主要运行参数，即 P_{in} 和 S 的值。

步骤二

如果事先没有的话，就假设一个输入电压值，以及电枢绕组和励磁绕组的电阻值。

步骤三

计算 K_m。列出电动机在稳态条件下的运行方程：

$$V_a = i_a R_a + E_{cm}$$

$$V_f = i_f R_f \tag{5-10}$$

和

$$V_{in} = i_a R_a + i_f R_f + E_{cm} \tag{5-11}$$

因为 $i_a = i_f$，所以就能列出额定工作条件（$\omega = \omega_{nom}$和 $i_a = i_f = i_{nom}$）下总的电压方程

$$V_{in} = i_{nom}(R_a + R_f) + K_m i_{nom} \omega_{nom} \tag{5-12}$$

和

$$K_m = \frac{V_{in} - i_{nom}(R_a + R_f)}{i_{nom} \omega_{nom}} \tag{5-13}$$

步骤四

从起动转矩中计算 A 值。

由稳态以及起动条件（$\omega = 0$）下的机械方程可得：

$$\tau_e = \tau_L = A = K_m i_{min}^2 \tag{5-14}$$

考虑电机的最低工作功率 P_{min}：

$$i_{min} \frac{P_{min}}{V_{in}} \tag{5-15}$$

把从技术数据表查到的 P_{min}值以及标称电压值代入该式可得：

$$A = K_m \frac{P_{min}^2}{V_{in}^2} \tag{5-16}$$

步骤五

假设 F 值并计算 B。

B 的值是从稳态下的机械等式方程中计算得出的，此时角速度和输入电流均取标称值。

$$\tau_e = F\omega_{nom} + A + B\omega_{om}^2 = K_m i_{nom}^2 \tag{5-17}$$

和

$$B = \frac{K_m i_{nom}^2 - F\omega_{nom} - A}{\omega_{om}^2} \tag{5-18}$$

例 5.1 同样以表 5-1 中的数据计算 A、B 和 K_m 值。

步骤一

$$H = 11.5\text{m}$$
$$S = 3000\text{r/min}$$
$$P_{in} = 340\text{W}$$
$$\omega = 314\text{rad/s}$$

步骤二

$$V_{in} = 200\text{V}$$
$$R_a + R_f = 0.3 \tag{5-19}$$

步骤三

$$K_m = \frac{V_{in} - i_{nom}(R_a + R_f)}{i_{nom}\omega_{nom}} = \frac{200 - 1.7 \times 0.3}{1.7 \times 3000 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.37 \tag{5-20}$$

步骤四

$$P_{min} = 100\text{W}$$

$$A = K_m \frac{P_{min}^2}{V_{in}^2} = 0.37 \frac{1 \times 10^4}{200^2} = 0.0925 \tag{5-21}$$

步骤五

计算 B 值。

$$B = \frac{K_m i_{nom}^2 - F\omega_{nom} - A}{\omega_{om}^2} = \frac{0.37 \times 1.7^2 - 8.3 \times 10^{-4} \times 314 - 0.0925}{314^2} = 7.26 \times 10^{-6} \tag{5-22}$$

稳态解中没有惯性量 J 及电感 L_a 和 L_f，但是在考虑动态响应的情况下仍然可以给出合理的假设。为了计算电动机—泵系统的小信号动态性能，可以使用变分法（Variational Method）将方程线性化，然后进行拉普拉斯变换。首先考虑一个稳态工作点（V_{ino}，I_{ino}，W_{ino}），并认为这三个变量的瞬时值是稳态值及其时变增量（下标 1）的叠加，如下：

$$V_{in} = V_{ino} + v_1$$
$$I_{in} = I_{ino} + i_1$$
$$\omega = \omega_o + \omega_1 \tag{5-23}$$

将式（5-23）代入式（5-7）中，表示电动机—泵系统动态运行状况的小信号方程如下：

$$V_{ino} + v_1 = (i_o + i_1)(R_a + R_f) + (L_a + L_f)\frac{di_1}{dt} + K_m(i_o + i_1)(\omega_o + \omega_1)$$

$$J\frac{d\omega_1}{dt} + F(\omega_o + \omega)_1 + A + B(\omega_o + \omega_1)^2 = K_m(i_o + i_1)^2 \tag{5-24}$$

将稳态方程考虑进去：

$$v_1 = i_1(R_a + R_f) + (L_a + L_f)\frac{di_1}{dt} + K_m(i_o\omega_1 + \omega_o i_1 + \omega_1 i_1)$$

$$J\frac{d\omega_1}{dt} + F\omega_1 + B(2\omega_o\omega_1 + \omega_1^2) = K_m(2i_o i_1 + i_1^2) \tag{5-25}$$

现在忽略二阶状态条件（$\omega_1 i_1$，ω_1^2，i_1^2）：

$$v_1 = i_1(R_a + R_f) + (L_a + L_f)\frac{di_1}{dt} + K_m(i_o\omega_1 + \omega_o i_1)$$

$$J\frac{d\omega_1}{dt} + F\omega_1 + B2\omega_o\omega_1 = 2K_m i_o i_1 \tag{5-26}$$

将这些线性方程进行拉普拉斯变换：

$$v_1(s)=i_1(s)[(R_a+R_f)+s(L_a+L_f)+K_m\omega_o]+K_m i_o\omega_1(s)$$

$$(sJ+F+2B\omega_o)\omega_1(s)=2K_m i_o i_1(s) \tag{5-27}$$

电动机—泵系统的机械动态响应比电气响应要慢得多，可假设电枢电流增加时角速度不变。从式（5-27）可推出电气时间常数。也就是说，假设 $\omega_1(s)=0$，输入电压与电枢电流的关系就是：

$$i_1(s)\approx\frac{v_1(s)}{[(R_a+R_f)+s(L_a+L_f)+K_m\omega_o]}=\frac{v_1(s)}{(R_a+R_f+K_m\omega_o)}\frac{1}{1+s\dfrac{L_a+L_f}{(R_a+R_f+K_m\omega_o)}} \tag{5-28}$$

时间常数可通过下式确定：

$$\tau_{\text{ELECTR}}=\frac{L_a+L_f}{(R_a+R_f+K_m\omega_o)} \tag{5-29}$$

再使用式（5-27）：

$$\omega_1(s)=v_1(s)\frac{1}{\dfrac{(sJ+F+2B\omega_o)}{2K_m i_o}[R_a+R_f+K_m\omega_o+s(L_a+L_f)]+K_m i_o} \tag{5-30}$$

然后就可以得出：

$$\omega_1(s)=\frac{v_1(s)}{K_m i_o+\dfrac{(F+2B\omega_o)(R_a+R_f+K_m\omega_o)}{2K_m i_o}}\frac{1}{1+s\tau_M} \tag{5-31}$$

其中

$$T_M=\frac{J}{F+2B\omega_o}\frac{1}{1+\dfrac{2K_m^2 i_o^2}{(F+2B\omega_o)(R_a+R_f+K_m\omega_o)}} \tag{5-32}$$

式（5-28）和式（5-32）可用来计算 L_a、L_f 和 J 的值，下面通过一个例子来说明。

例 5.2 应用例 5.1 中的结果和数据，计算（L_a+L_f）和 J 的值，并假设电气时间常数是 5ms，机械时间常数是 5s。在额定运行条件下，通过逐步（以 1V 为步长）增大输入电压来仿真电动机—泵系统的电气和机械响应。

应用式（5-29），并采用与例 5.1 中$(R_a+R_f)=0.3\Omega$ 同样的数值，就可计算出（L_a+L_f）的值：

$$L_a+L_f=1.16H$$

假定摩擦力 $F=0.0083$，根据式（5-32）就可计算惯性数值 $J=0.0608$。

5.2.4 一个 PV 阵列—直流串励电动机离心泵系统的 PSpice 仿真

采用例 5.1 和例 5.2 计算出的参数，并按图 5-3 所示的原理图，就可以给出能对该电动机—泵系统进行仿真的子电路网表文件。

```
.subckt pump 500 501 570 PARAMS: RA=1,LA=1,KM=1,A=1,B=1
+  F=1, J=1, RF=1, LF=1, A1=1, B1=1, C1=1, H=1

ra 501 502 {RA}
la 502 503 {LA}
econ 503 504 value={{KM}*v(508)*v(507)}
rf 504 505 {RF}
lf 505 506 {LF}
vs 506 0 dc 0
gte 0 507 value={{KM}*v(508)*v(508)}
gtl 507 0 value={A+B*v(507)*v(507)}
rdamping 507 0 {1/{F}}
cj 507 0 {J}
d2 0 507 diode
.model diode d
gif 0 508 value={(v(504)-v(505))/{RF}}
rif 508 0 1

.IC v(507)=0

*** revoluciones rpm=omega*(60/2/pi)
erpm 540 0 value={v(507)*60/6.28}
eflow 550 0 value={(-B1}*v(540)-sqrt(({B1}^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*
+(A1*(v(540)^2)-{H})))/(2*{C1})}
eraiz 560 0 value={({B1}^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*(A1*(v(540)^2)-{H})}
eflow2 570 0 value={if (v(560)>0, v(550),0)};.ends pump
```

大部分涉及的参数都可以通过图 5-3 和本章节的方程来确定。下面的子电路用来仿真这个电动机和泵的暂态响应。

```
*water_pump_transient

.include pump.lib

xpump 0 44 50 pump params: RA=0.15,LA=0.58,KM=0.37,A=0.0925,B=7.26e-6

+  F  0.00083,RF  0.15,LF  0.58,J  0.0608,A1  1.35e-6,B1  0.0015,C1  -3.32,H  11.5

vin 44 0 0 pulse (0,200,0,10m,10m,50,100)

.tran 0.01u 20 1e-6

.probe

.end
```

图 5-5 显示了在额定运行条件下缓慢的机械响应，它给出了电源开关闭合后离心泵流量的变化情况。

从图 5-5 中可以看出，大约 7.5s 之前流量一直保持在 0 左右，然后上升至预期的 1.5l/s 的稳态值。离心泵在扬程 11.5m 处也达到了表 5-1 所示的预期电功率 340W。本章描述的这个模型将在第 7 章中用于对水泵系统长期运行特性的仿真。

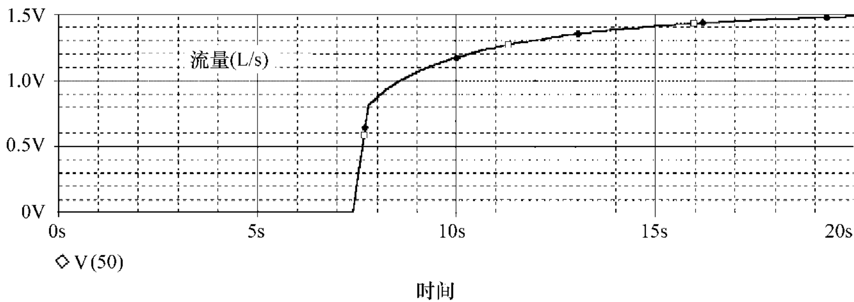


图 5-5 离心泵在 200V 阶跃电压作用下产生的流量变化

注：y 轴代表流量，单位为 L/s。

5.3 PV 模块连接到一个电池和负载

图 5-6 给出了最常见的 PV 系统和蓄电池及负载的连接图。图中这三个部件是并联的。在 PV 模块没有辐照不能产生电能，或者产生的电能不能满足需求时，就需要用蓄电池来持续向负载供电。而当 PV 模块产生的电能超过负载需求时，蓄电池可储存多余的能量。

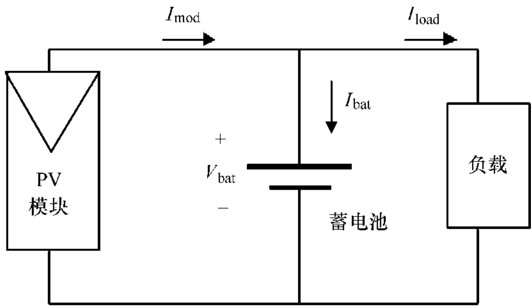


图 5-6 基本的离网 PV 系统

蓄电池是一个储能元件，可以看成是连接到 PV 模块输出端的容性负荷。从图 5-6 可以看出，电压 V_{bat}就是一个普通的元器件，它也遵循基尔霍夫电流定律（KCL）。

流过这三个部件的电流关系如下：

$$I_{mod} = I_{bat} + I_{load} \tag{5-33}$$

式中，I_{mod}是 PV 系统的输出电流，I_{bat}是流入蓄电池的电流，I_{load}是流入负载的电流。从图 5-6 可以看出，I_{bat}在蓄电池正极端的符号是正的，表示给蓄电池充电；当符号变为负之后，表示蓄电池在放电。I_{bat}符号的正负由 PV 系统按照辐照度和温度决定的伏安特性的瞬时值以及负载的电流瞬时值决定。

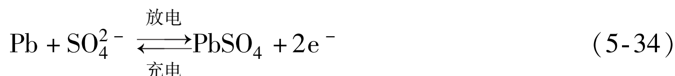
5.3.1 铅酸蓄电池特性

铅酸蓄电池是离网 PV 系统中最常用的储能元件。在 PV 系统中铅酸蓄电池具有可接受的性能特点和寿命成本。在某些应用中，比如小功率 PV 应用，镍镉电池是一个不错的选择，尽管它的成本相对铅酸蓄电池要高。

铅酸蓄电池由浸入到稀硫酸溶液中的正、负两个极板组成。正极板，即阳极由二氧化铅（PbO_2）制成；负极板，即阴极由铅制成。

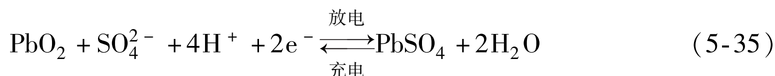
在充放电过程中，蓄电池发生如下的化学反应：

负极板，即阴极：



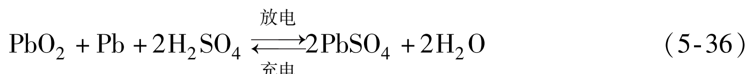
$$Pb + SO_4^{2-} \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2e^- \qquad (5\text{-}34)$$

正极板，即阳极：



$$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2H_2O \qquad (5\text{-}35)$$

蓄电池中总的反应：



$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O \qquad (5\text{-}36)$$

通过上面的讨论可知，按照 I_{bet} 符号的不同，蓄电池能够在充电和放电这两种模式下工作。

当蓄电池工作在充电模式时，电流 I_{bat} 流进蓄电池正极，蓄电池电压 V_{bat} 缓慢上升，储存的电荷随之增加。相反，当工作在放电模式时，电流流出蓄电池正极，蓄电池电压 V_{bat} 降低，蓄电池电荷因供给负载而减少。

除了这两种主要的工作模式外，如果考虑到两种额外的工作状态，即欠充电和过充电，就能建立更好地模拟蓄电池复杂特性的模型。

当蓄电池储存的电荷接近推荐的最小值，并且外部电路条件迫使蓄电池进一步放电时，会出现欠充电状态。表现为蓄电池内部电解液浓度急剧减少，形成电池元素沉降在底部的现象。这个过程会极大地降低蓄电池的总容量。如果长期处于这种状态，蓄电池就会遭到不可逆转的损毁。

当蓄电池存储电荷超过推荐的最大值时，就到达了过充电状态。这时会产生两种不同的效应：析气和蓄电池正极板材料腐蚀。在这种状态下蓄电池有效的容量显著减少。如果保持过充电使蓄电池进入饱和状态，那么它就不能再存储电荷了。图 5-7 说明了一个 2V 的蓄电池元件在上述两种状态过程中蓄电池电压的变化情况。从图中可看出，蓄电池电压经缓慢增长后，在过充电并进入饱和区后电压停滞不再增加。随着放电的开始，蓄电池电压急剧下降到达欠放电区域，然后蓄电池电压下降至零。

通常定义和评估蓄电池的主要参数是：①标称容量 C_x，意为该放电速率下放电时间 x 小时；②充放电速率；③荷电状态，SOC。

（1）标称容量

标称容量即蓄电池能储存的总电荷量。这个参数是由制造商提供的，通常是指在一定的温度和放电速率下，在规定的一段时间内蓄电池释放的电荷量。

根据电池放电时间的长度，可以定义不同的标称容量。制造商提供的大部分标准的放电时间是 5h、10h 和 100h。对应的标称容量就是 C_5、C_{10} 和 C_{100}，单位为 Ah，下标表示放电时间。

对于具体的蓄电池，蓄电池标称容量也与其充放电速率有关，图 5-8 给出了在

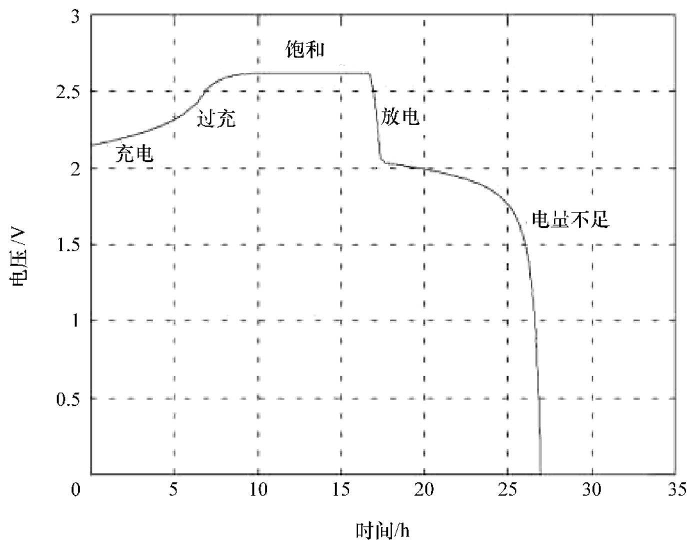


图 5-7　蓄电池运行模式

不同恒定放电速率下，100Ah 蓄电池可以利用的标称容量的例子。

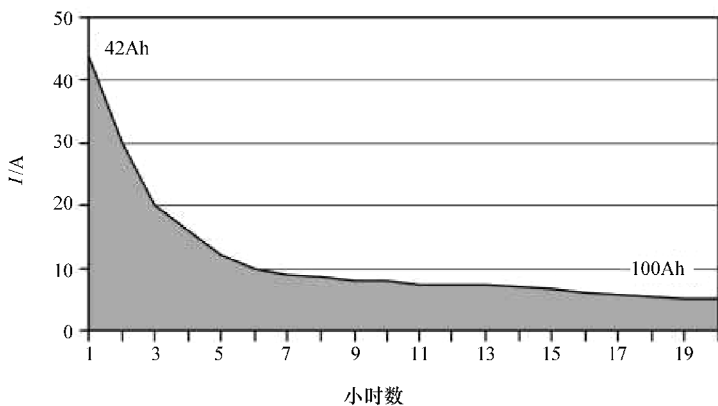


图 5-8　电池容量与放电速率变化关系

有时候蓄电池的标称容量是以能量单位的形式给出的，它表示蓄电池从充满电状态到截止电压时提供的总能量，单位为 Wh。这时有下式：

$$C_x(\mathrm{Wh}) = C_x(\mathrm{Ah})V_{bat}(\mathrm{V}) \tag{5-37}$$

式中，x 是放电时间长度，V_{bat}是蓄电池电压。

（2）充放电速率

充放电速率用来表示蓄电池标称容量和充放电电流值之间的关系。放电时的放

电速率就是以恒定电流放电需要的时间，放电速率与之前章节中标称容量的下标是一致的。

蓄电池容量是充放电速率的函数。随着放电速率延长，标称容量也相应增加，这种现象可以理解为电解液更加深入地渗入到电池极板材料中。

（3）蓄电池荷电状态 SOC

在很多蓄电池模型中，荷电状态是一个重要的参数。它与蓄电池在给定时间内存储的电荷相关联。SOC 值就是一定时间内可用电荷对最大容量的比值，可用如下表达式：

$$\mathrm{SOC} = \left(1 - \frac{Q}{C}\right) \tag{5-38}$$

$$0 \leqslant \mathrm{SOC} \leqslant 1 \tag{5-39}$$

式中，C 是蓄电池容量，单位为 Ah；Q 表示蓄电池在要求的时间内已经放出的电量，单位为 Ah。

由式（5-38）可以看出，SOC 是蓄电池容量 C 的函数。除了与电解液温度有关外，SOC 紧紧依赖于之前讨论过的充放电速率的历史状态。要建立蓄电池正确的行为模型，这一点必须加以考虑。

作为对 SOC 补充的一个参数是放电深度 DOD。它代表蓄电池达到的放电程度，由下式给出：

$$\mathrm{DOD} = 1 - \mathrm{SOC} \tag{5-40}$$

在一些文献中，SOC 以能量单位的形式给出，等于在给定时间蓄电池的剩余能量值。在蓄电池模型中，我们将使用下列与 SOC 相关的参数：

$\mathrm{SOC_1}$	初始的蓄电池荷电状态%
$\mathrm{SOC_m}$	蓄电池最大能量
$\mathrm{SOC_n}(t)(\%)$	剩余能量对 $\mathrm{SOC_m}$ 的百分比

5.3.2　铅酸蓄电池 PSpice 模型

给铅酸蓄电池建立模型相当困难，其中对蓄电池充电状态值的估算被认为是最复杂的工作[5.3,5.4]之一。本节介绍一个反映铅酸电池 SOC（Wh）动态特性的 PSpice 模型，它能够对蓄电池性能进行准确的仿真。

这个模型是基于参考文献［5.5］Lasnier 和 Tang 描述的方程以及早期的 PSpice 版本建立的，这个蓄电池模型具有以下输入参数：

1）初始荷电状态：$\mathrm{SOC_1}$（%），给出有效荷电；

2）最大充电状态：$\mathrm{SOC_m}$（Wh），蓄电池最大容量；

3）2V 电池串联数量：n_s；

4）关于蓄电池特性的两个经验常数：

① K（adimensional）：充放电效率；

② D（$\mathrm{h^{-1}}$）：电池自放电速率。

蓄电池的电气模型是由一个电压源 V_1 串联一个电阻 R_1 组成的，如图 5-9 所示。V_1 和 R_1 的值取决于在给定时间内蓄电池的运行模式。

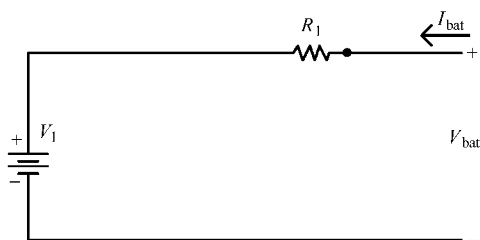


图 5-9　蓄电池模型

尽管所有的蓄电池运行模式都可以考虑，在此我们仅限于考虑两种主要的运行模式：充电模式和放电模式。需要注意的是 PV 系统包含过充和欠充保护，从而避免减少蓄电池使用寿命以及 PV 系统因维护和更换器件而额外支出的费用。

这个蓄电池模型基本包含了在不同工作模式中由不同表达式计算出的 V_1 和 R_1 的值，表示如下：

充电模式：

$$V_1 = V_{ch} = (2 + 0.148\beta) n_s \tag{5-41}$$

$$R_1 = R_{ch} = \frac{0.758 + \dfrac{0.1309}{(1.06 - \beta)}}{SOC_m} n_s \tag{5-42}$$

和

$$\beta = \frac{SOC}{SOC_m} \tag{5-43}$$

式中，下标 ch 表示充电模式。SOC_m 是之前定义的蓄电池最大容量，即模型的输入参数之一；SOC 是在给定时间蓄电池的荷电状态，它由模型内部计算获得。两个参数的单位都是 Wh。蓄电池电压由下式给出：

$$V_{bat} = V_{ch} + I_{bat} R_{ch} \tag{5-44}$$

放电模式：

$$V_1 = V_{dch} = (1.926 + 0.124\beta) n_s \tag{5-45}$$

$$R_1 = R_{dch} = \frac{0.19 + \dfrac{0.1037}{(\beta - 0.14)}}{SOC_m} n_s \tag{5-46}$$

式中，下标 dch 表示放电模式。输出电压表示如下：

$$V_{bat} = V_{ch} + I_{bat} R_{dch} \tag{5-47}$$

式中，蓄电池电流 I_{bat} 的定义可参见图 5-9，取负值。

蓄电池模型由图 5-10 所示的 PSpice 等效电路表示。图中控制电压源 evch 和 evdch 分别表示电压 V_{ch}和 V_{dch}。

PSpice 模型通过使用两个电流控制开关 Wch 和 Wdch 来实现蓄电池充电模式与放电模式之间的相互转换，如图 5-10 所示。

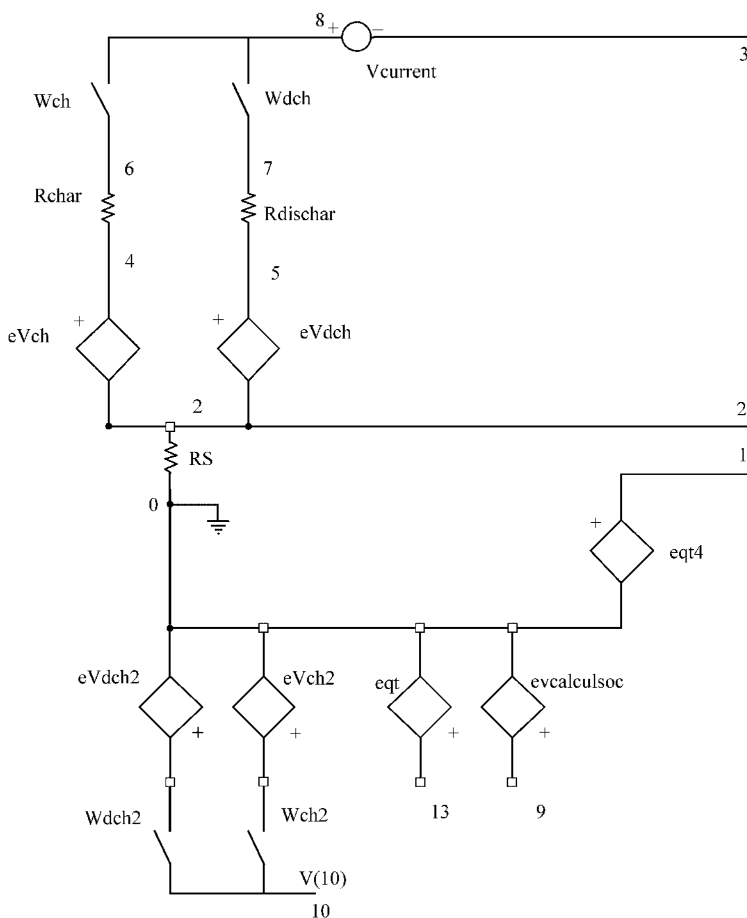


图 5-10　蓄电池等效电路原理图

从图中可看出，按照充放电不同的运行模式，这两个开关将输出节点分别连到内部相应的电压源和电阻上。具体的运行模式取决于电流 I_{bat}的正负极性：正极性就是充电模式，负极性就是放电模式。具体的极性由图中的 Vcurent 测定。

PSpice 模型重要的功能之一就是用来估算 SOC（Wh）的瞬时值。估算由下列等式实现：

$$\mathrm{SOC}(t+\mathrm{d}t)=\mathrm{SOC}(t)\left(1-\frac{D}{3600}\mathrm{d}t\right)+k\left(\frac{V_{bat}I_{bat}-R_1I_{bat}^2}{3600}\right)\mathrm{d}t \tag{5-48}$$

式中所有的参数都已经定义过了。式（5-48）基本上是一个计算 SOC 增量的能量平衡等式。这个增量就是考虑了自放电和充放电效率的因素后在一个时间增量内所增加的能量。因为时间单位是 s，式中有些项就需要除 3600 以使 SOC 的单位为 Wh。

因为 V_{bat} 是 V_1 的函数（见图 5-9），式（5-48）可以简化为式（5-49）：

$$\mathrm{SOC}(t+\mathrm{d}t)=\mathrm{SOC}(t)\left(1-\frac{D}{3600}\mathrm{d}t\right)+\left(\frac{kV_1I_{bat}}{3600}\right)\mathrm{d}t \tag{5-49}$$

最后

$$\frac{\mathrm{SOC}(t+\mathrm{d}t)-\mathrm{SOC}(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{(kV_1I_{bat})}{3600}-\frac{D\mathrm{SOC}(t)}{3600} \tag{5-50}$$

从子电路的网表文件中可见，式（5-50）可以容易地使用 sdt PSpice 时间积分运算求解。文件中用受控电压源 eqt 估算 SOC 值，表达式如下：

$$\mathrm{SOC_n}(t)=\mathrm{SOC_1}+\frac{1}{\mathrm{SOC_m}}\int\left(\frac{kV_1I_{bat}}{3600}\right)-\frac{D\mathrm{SOC_n}(t-\tau)\mathrm{SOC_m}}{3600}\mathrm{d}t \tag{5-51}$$

式中，$\mathrm{SOC_1}$ 是蓄电池初始荷电状态，用百分比表示，$\mathrm{SOC_m}$ 是蓄电池最大容量，单位是 Wh，$\mathrm{SOC_n}(t)$ 就是 SOC 相对于最大充电状态 $\mathrm{SOC_m}$ 的标准化值，因此 $\mathrm{SOC_n}$ 就是 SOC 百分值表示。可以看出，为了简化式（5-50）的数值分解，在式（5-51）中使用了一个近似值。用 $\mathrm{SOC_n}(t-\tau)$ 代替 $\mathrm{SOC}(t)$，τ 是 PSpice 仿真时内部的时间步长。

受控电压源 evcalculsoc、eqt、evch2、ecdch2 和开关 Wch2、Wdch2 用来估算 $\mathrm{SOC_n}$（t）的变化过程。以上说明可参见图 5-10 和以下的网表文件“bat. cir”。下面的网表文件中的受控电压源 eqt4（参见图 5-10）限制电池模型输出端，即电池子电路端子 1 的 $\mathrm{SOC_n}$ 值。这由下列语句实现：

```
eqt4 1 0 value {limit (v(13), 0, 1)}
```

式中，v（13）就是 $\mathrm{SOC_n}$ 的估算值，遵循式（5-51），受控于蓄电池模型中的电压 eqt。

由网表文件描述的蓄电池模型子电路有三个节点，参见图 5-11：

1）$\pm V_{bat}$，网表文件中的节点（3）和节点（2）；

2）$\mathrm{SOC_n}$，节点（1）。该节点电压对应于标称 SOC（t）值，由式（5-51）计算确定。它的值限定在 0 和 1 之间。

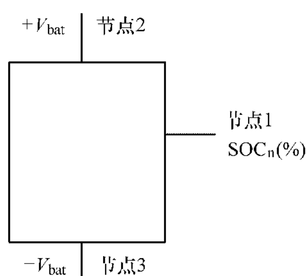


图 5-11　bat. cir 文件描述的蓄电池模型的三个节点

```
* lead-acid battery model *
* Bat.cir
.subckt bat 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1

evch 4 2 value={(2+(0.148*v(1)))*ns}
evdch 5 2 value={(1.926+(0.124*v(1)))*ns}
rs 2 0 0.000001
rch 4 6 {rchar}
.func rchar() {(0.758+(0.1309/(1.06-SOC1)))*ns/SOCm}
rdch 5 7 {rdischar}
.func rdischar() {(0.19-(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns/SOCm}
vcurrent 3 8 dc 0
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-3, ion=10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
Wdiscar 7 8 vcurrent sw2mod
.model sw2mod iswitch (ioff=10e-3, ion=-10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)

* SOCn evolution
eqt 13 0 value={SOC1+(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 0 value=limit (v(13), 0, 1)}
evcalculsoc 9 0 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}

evch2 11 0 value={(2+(0.148*v(1)))*ns}
evdch2 12 0 value={(1.926-(0.124*v(1)))*ns}
Wdch2 12 10 vcurrent sw2mod
Wch2 11 10 vcurrent sw1mod
.ends bat
```

尽管由于这个模型局限于充电和放电两种运行状态中，因此也就将该模型的使用限定在安全区内的 SOC 值，其典型值在最大值的 30% ~80%，但是总的来说其仿真结果提供了良好的评估。并且它具有计算快速的优点，故便于学生使用各种 PSpice 软件版本进行 SOC 评估。这就是在此我们并没有考虑温度影响的原因，虽然温度影响是很容易被考虑进来的。有关说明请参考文献［5.5］和［5.6］。

下面的例 5.3 可以看出这个模型的主要特征。

例 5.3 写出 PSpice 网表文件用来仿真蓄电池电压变化过程和充电状态。如图 5-12 所示，驱动电源是幅值 20A，频率 1kHz 的正弦电流源。电池组由 12 个标称电压为 2V 的电池串联组成，最大 SOC = 1200Wh，充放电效率 $k=0.8$，蓄电池自放电速率 $D=0.001\text{h}^{-1}$，标准荷电状态的初始值 $SOC_1=50\%$。

解 电路如图 5-12 所示，其 PSpice 网表文件如下：

```
* Example 5.3. cir
.inc bat.cir
.temp=27
xbat1 3 2 1 bat params: ns=12, SOCm=1200, k=0.8, D=1e-3, SOC1=0.5
isin 2 3 sin (0 20 0.001 0 0 0); sinusoidal current source
r44 1 0 1000000
.plot dc v(3)
.tran 1s 2000s
.probe
.end
```

图 5-13 显示了流进与流出蓄电池的电流和蓄电池电压的时间函数。可以通过电流过零点时电压的急剧变化看出蓄电池两种不同的运行模式，即充电和放电模式。

图 5-14 显示了标准充电状态的值。从图中可以看出在该周期开始时初始 SOC_1 值为 0.5，经正弦电源的 1/4 周期增加到最大值 0.53。根据仿真所得的电池电流 SOC_n 呈现周期性变化。

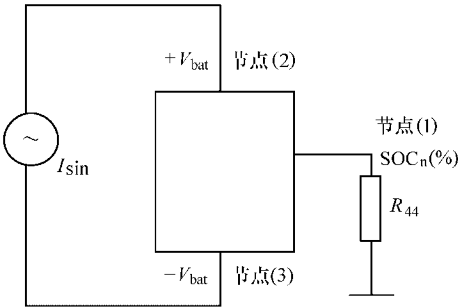


图 5-12 例 5.3 的原理图

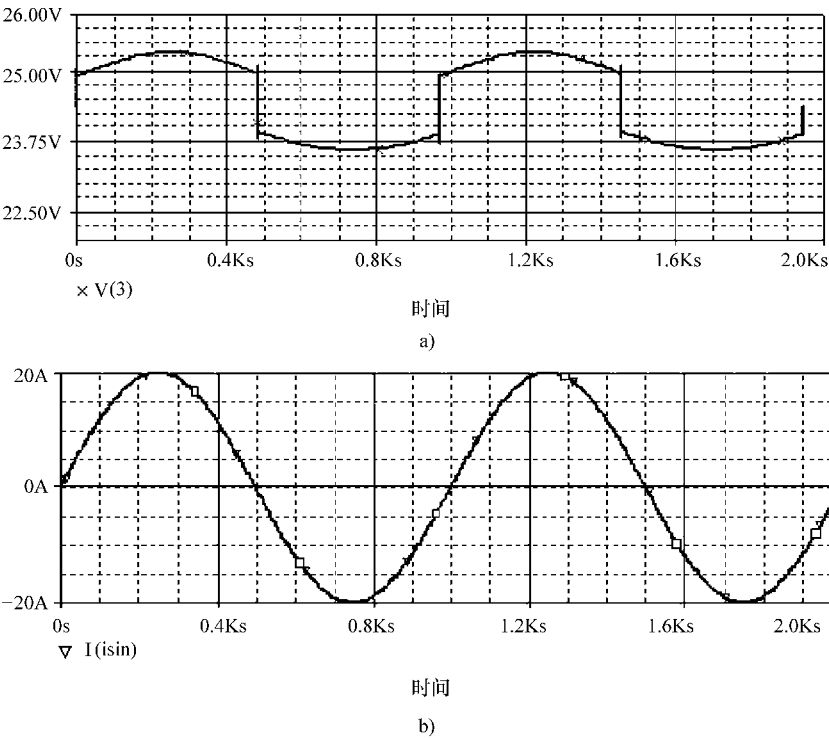


图 5-13 a）例 5.3 蓄电池电压；b）例 5.3 蓄电池电流

5.3.3 根据厂家参数调整的 PSpice 模型

到目前为止，所讨论的蓄电池模型都能够加以调整，使它能改善对包含任何已知的商用蓄电池的 PV 系统的 PSpice 仿真结果。仿真可使用制造商提供的数据或模型参数的经验数值，这将在例 5.4 中阐明。

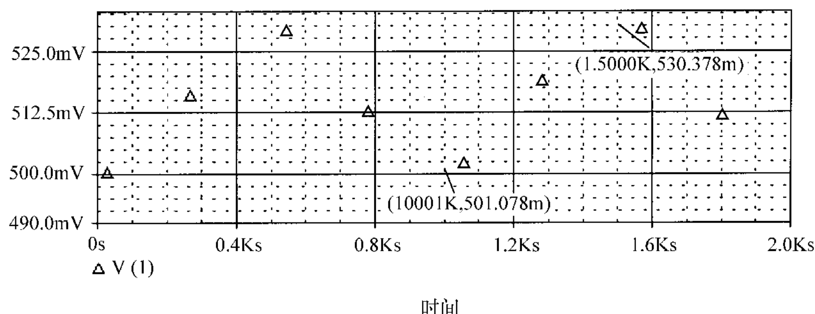


图 5-14　SOC_n 变化曲线，y 轴代表标准 SOC 值

例 5.4　参考在 ATERSA 的文献［5.7］中，给出的商业蓄电池模型 7TSE 70，具有如下参数：$C_{10}=784\text{Ah}$，$SOC_1=0.9$，$V_{bat}=2\text{V}$。充放电效率为 100%，$k=1$，蓄电池自放电速率 $D=1e-5\ (h^{-1})$。

根据式（5-41）和式（5-46）计算出它的内部电压 V_1 和电阻 R_1 的值，编写出调整后的子电路网表文件。

解　通过计算，结果参数值包含在下面经调整的文件里：

```
*7TSE.cir
.subckt bat 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1568, k=1, D=1e-5, SOC1=0.9
evch 4 2 value={(2+(0.16*v(1)))*ns}
evdch 5 2 value={(1.926+(0.248*v(1)))*ns}
rs 2 0 0.000001
rch 4 6 {rchar}
.func rchar() {(0.758+(0.1309/(1.06- SOC1)))*ns*100/SOCm}
rdch 5 7 {rdch}
.func rdch() {(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns*250/SOCm}
vcurrent 3 8 dc 0
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-3, ion=10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
Wdch 7 8 vcurrent sw2mod
.model sw2mod iswitch (ioff=10e-3, ion=-10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
* SOCn
eqt 13 0 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 0 value= {limit (v(13), 0, 1)}
evcalculsoc 9 0 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}
evch2 11 0 value={(2+(0.16*v(1)))*ns}
evdch2 12 0 value={(1.926+(0.248*v(1)))*ns}
Wdch2 12 10 vcurrent sw2mod
Wch2 11 10 vcurrent sw1mod
.ends bat
```

5.3.4　在现实的 PV 系统条件下的电池模型

模型旨在重现实际运行条件下系统的性能。一个实际的 PV 系统所处的气象条件和场地位置不同，其辐照度和温度值也随着时间而变化。虽然通常情况下，辐照度变化不会很剧烈，但是它的值却是随机的，这些参数值与 PV 组件在实验室条件

下的测量值是不同的。这样就会产生一个问题，蓄电池模型是否能够准确再现系统运行的动态性能。本节将介绍一个简单的程序，当上述实际系统的监察数据可获取时，它可以用来对仿真结果与实际系统的运行性能进行比较。

只要监测数据是电子格式的，并能转换成一个“stimulus” PSpice 文件，PSpice 就能很容易地处理它。相应的激励“stimulus”文件格式如下所示。

```
* file_ name. stl
. stimulus < vname > < iname > pwl
+ < time value > < variable value >
```

其中，以“v”开头的名词用作电压源，以“i”开头的名词用作电流源。在激励 PWL 源定义之后，所有行必须列出时间和变量的值；每行必须都以 + 标识开头。

一旦这个文件完成了，它就可以被包含在 . cir 文件中，如下所示：

```
. include file_ name. stl
vxx node + node − stimulus vname
```

若是一个电压源，本句中 vname 必须和激励文件中激励的语句保持一致。如果是电流源，那么 ixx 也应保持一致。

这可由下面给出的局部 exportmed3V. stl 和 exportmedl. stl 文件予以说明。除了第一行是文件标题外，文件通过 . stimulus 语句定义为激励，名为 Vgg 和 Igg。PWL 命令表示了激励类型为分段线性波形。

```
***exportmed3V  Vbat(V)
.stimulus Vgg pwl
+   0    26.414
+   120  26.44
+   240  26.462
+   360  26.483
+   480  26.506
+   600  26.518
+   720  26.527
+   840  26.539
```

```
*** exportmedI  Ibat(Ic - Id)
.stimulus Igg pwl
+   0    0.42916811
+   120  0.55016811
+   240  0.57716811
+   360  0.62513536
+   480  0.65013536
+   600  0.64816811
+   720  0.62516811
+   840  0.62513536
```

最后各数据用 text 文件格式组成三列，列分隔符就是列表键。如上所述，第一列必须是 + 符号，第二列对应 x 轴的时间，第三列对应各数据，如电流、电压等，这包含在下面的表达式中：

```
. inc  exportmed3v. stl
```

exportmed3v. stl 是包含在仿真中的激励文件。

所包含的激励必须是相应的电流源或电压源。例如网表文件中的以下语句：

```
vmeasured  4  2  stimulus  Vgg
```

该语句意为创建一个位于节点（4）和节点（2）之间的电压源 vmeasured。与其相关的电压数据包含在文件 exportmed3v. stl 中，是因为和电压源 vmeasured 相关的名为 Vgg 的激励在这个激励文件中有相同的激励名。

在例 5. 5 中将使用上述的两个激励文件。

例 5. 5　编写出一个离网 PV 系统的网表文件。该系统由 8 个 PV 模块（I_{sc} = 4. 4A，V_{oc} = 20. 5V）2 串 4 并组成，连接到 12 个 ATERSA 7TSE 70 蓄电池上。蓄电池组连接到如图 5-15 所示的可控负载上。

这个 PV 系统被放置在西班牙的巴塞罗那，连续 5 昼夜测量了蓄电池电压（V_{bat}）和电流（I_{bat}），以及负载和 PV 模块输出端的电压和电流值。负载为白炽灯。

在 5 天时间中测量所得的电池电流 I_{bat}，作为电流源放在 PSpice 网表文件中。它在 sexpotmedI. stl 文件里被定义为一个 PWL 电流激励。图 5-16 显示了蓄电池电流 I_{bat}5 天时间里的变化。

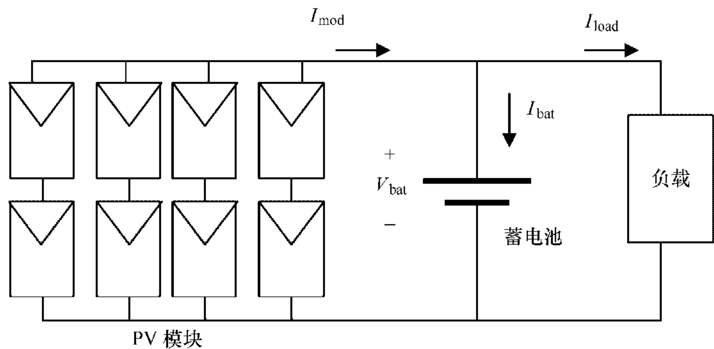


图 5-15　PV 系统原理图

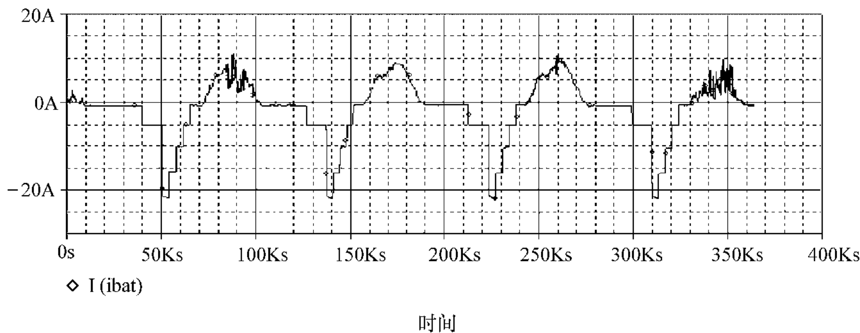


图 5-16　蓄电池电流 I_{bat}变化曲线

从图 5-16 中可以看出负载是在夜间被连接到蓄电池上的，负载的功率需求不是恒定的，网表文件如下：

```
* Example 5.5.cir
.temp = 27
.inc bat.cir
xbat1 3 2 1 bat params: ns = 12, SOCm = 13200, k = .8, D = 1e-5, SOC1 = 0.9
.inc exportmed3V.stl
vmeasured 4 2 stimulus Vgg
.inc exportmedI.stl
ibat 2 3 stimulus igg
r44 4 2 1000000
.plot dc v(3)
.tran 1s 364200s
.probe
.end
```

这 5 天时间内测量的蓄电池电压，作为电压源 vmeasured 包含在 PSpice 网表中。它在 expotmed3V. stl 文件中作为 PWL 电压激励，这个电压源放在网表中可用以和 PSpice 仿真获得的蓄电池电压做最终比较，如图 5-17 所示。图中 v（4）是实际测得的蓄电池电压，v（3）是同一节点仿真所得的电压。

图 5-18 显示了测量所得的 v（4）和仿真所得的 v（3）之间的误差。仿真结果是使用 RMS PSPice 功能计算获得的。

最后，作为 PSpice 仿真结果所得的蓄电池标准的荷电状态 SOC_n 的变换过程如图 5-19 所示。

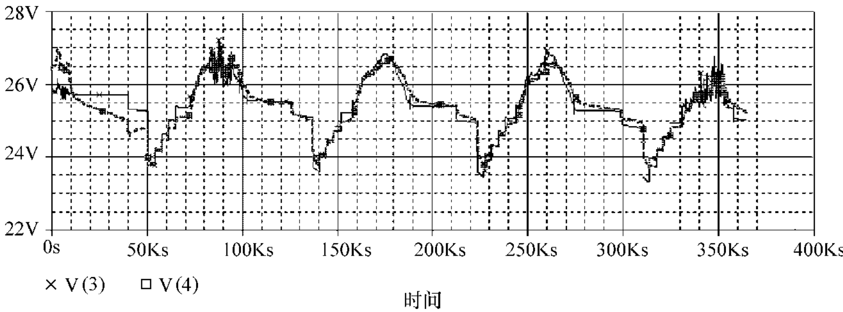


图 5-17　蓄电池电压变化曲线

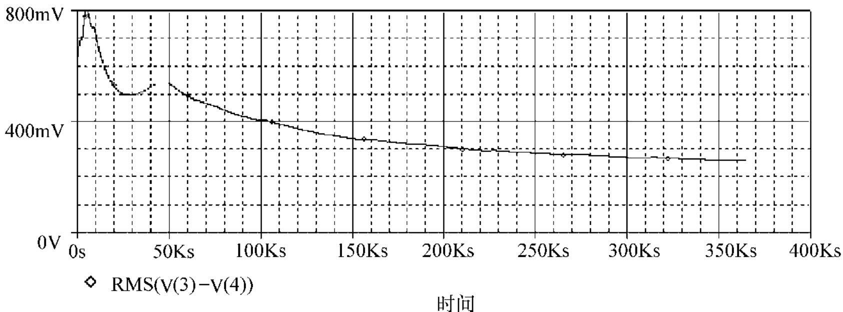


图 5-18　误差评估

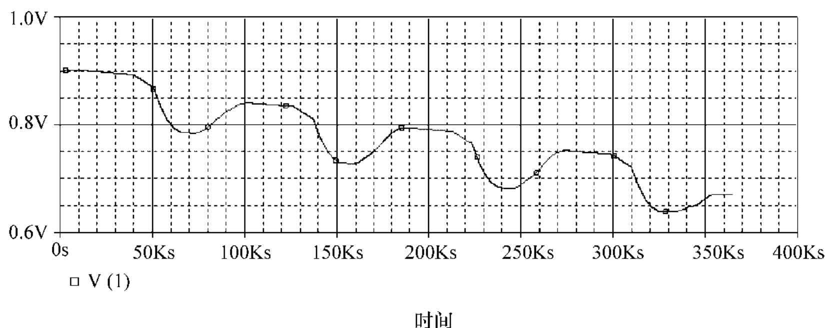


图 5-19 SOC_1 仿真结果

注：y 轴是 SOC_n 值。

从图中可以看出，SOC_n 值的变化范围从初始值的 0.9 到最后第 5 天结束时的 0.668。

正如本章之前论述的，蓄电池模型在 SOC 值超过 0.8 的情况下不能很好地工作，因为这个模型没有考虑过充电的情况。这就解释了图 5-18 中的误差。在仿真开始时误差较大，因为此时 SOC 值比较大。随着 SOC 值的降低，误差也跟着降低。正如所期望的，一旦蓄电池进入放电模式，模型就能更准确地呈现蓄电池的性能了。

作为最后一个例子，下面给出应用 PSpice 电池模型对图 5-6 所示的由一个 PV 模块、一个蓄电池和一个负载组成的离网 PC 系统进行仿真的示例。

例 5.6 一个铅酸蓄电池具有如下参数：

_初始荷电状态：$SOC_1=0.85$

1）最大荷电状态：$SOC_m=576Wh$；

2）2V 电池串联单元数：$n_s=6$；

3）$K=0.7$，充放电效率；

4）$D=1e-3$（h^{-1}），蓄电池自放电率。

该铅酸蓄电池连接到一个由 36 个太阳电池单元串联成的 PV 模块中，PV 模块的参数如下：

1）短路电流，$i_{scmr}=5A$；

2）开路电压 $v_{ocmr}=22.3V$；

3）最大输出功率，$p_{maxr}=85W$。

蓄电池上固定连接一个 4Ω 的直流负载。

将图 5-20 中光照特性作为输入数据，对该 PV 系统进行仿真。

1）编写出对上述 PV 系统进行仿真的网表文件。将光照特性参数写入 Irrad2. stl 文件，电路图如图 5-21 所示。

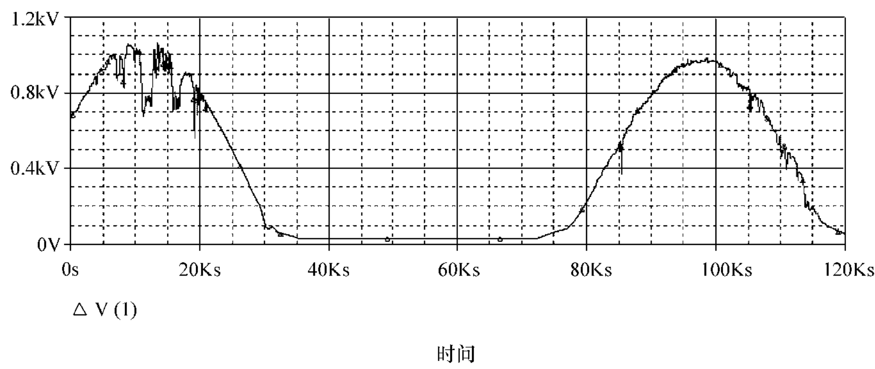


图 5-20 例 5.6 中考虑光照特性参数

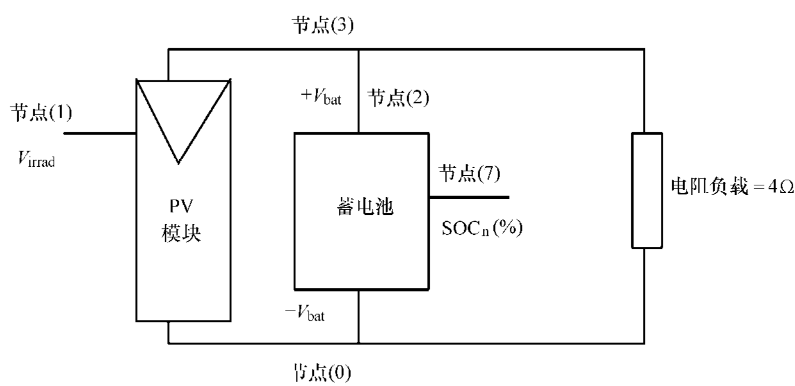


图 5-21 例 5.6 的原理图

例 5.6 的网表文件参见附录 E。

2）运行 PSpice 仿真，得到蓄电池的电压和电流波形，仿真结果如图 5-22 和图 5-23 所示。

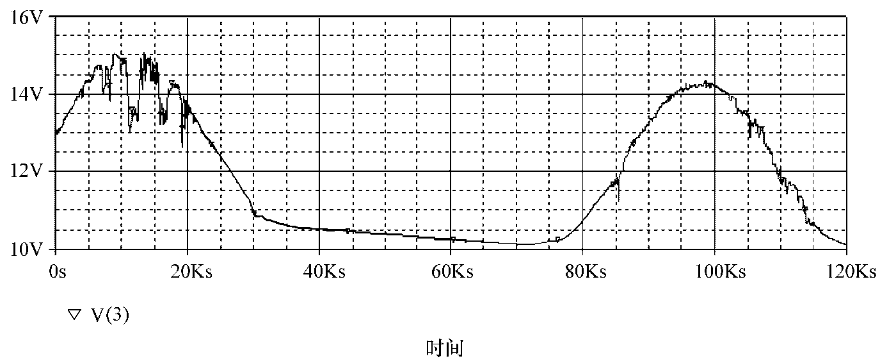


图 5-22 例 5.6 的蓄电池电压波形图

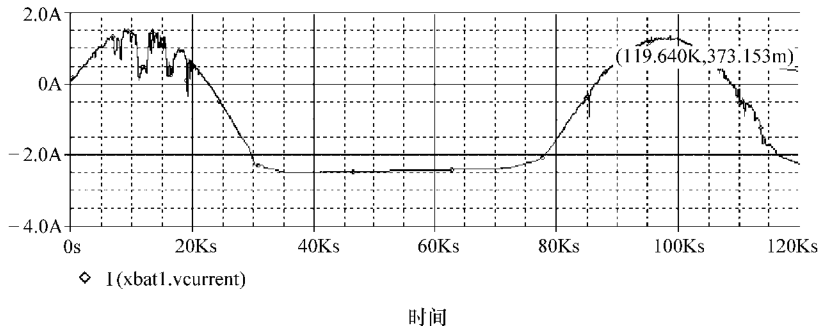


图 5-23 例 5.6 的蓄电池电流波形图

3）绘出蓄电池 SOC 变化过程，并获得它的最终值。SOC 的波形如图 5-24 所示。

在两天（模拟值）之后，蓄电池的 SOC 值是 0.37。

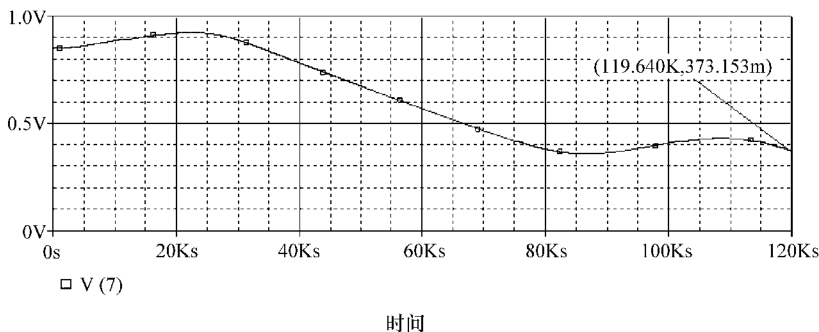


图 5-24 例 5.6 的蓄电池 SOC 波形图

5.3.5 简化后的 PSpice 电池模型

若考虑图 5-9 所示的蓄电池模型在其充放电时保持电阻 R_1 有同样的值，则前面章节所述的蓄电池模型还能进一步简化。这在一些应用中会降低仿真精度，但是对一个特定的蓄电池只要选择合适的数值，一般还是能获得比较好的仿真结果的。

对蓄电池模型进行简化，生成一个新的蓄电池模型，它不用考虑图 5-10 中所示模型的一些开关。去除这些开关后能减少 PSpice 仿真时不收敛的概率。该简化蓄电池模型仿真用的网表如下所示。使用 if 语句取代开关就能获得一个更紧凑的蓄电池模型。当仿真时由于模型存在开关的原因造成不收敛，因此我们极力建议使用该简化的蓄电池模型进行仿真。

图 5-25 是对应于该简化蓄电池模型网表的原理图。在这个新模型中的连接节点和前面图 5-11 中的蓄电池模型的节点是相同的。相应的网表如下：

```
************ Simplified battery model
*batstd.cir
.subckt batst 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch 4 2 value={(2+(0.16*v(1)))*ns}
evdch 5 2 value={(1.926+(0.248*v(1)))*ns}
rserie 8 88 {rs}
.func rs() {(0.7+(0.1/(abs(SOC1-0.2))))*ns/SOCm}
ebat 88 2 value={IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}
vcurrent 3 8 dc 0
rsc 2 0 0.0001
eqt 13 2 value={SOC1 +(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 2 value= {limit (v(13), 0, 1)}
evcalculsoc 9 2 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}
ecoch 10 2 value={IF (i(vcurrent) >0, v(4), v(5))}
.ends batst
```

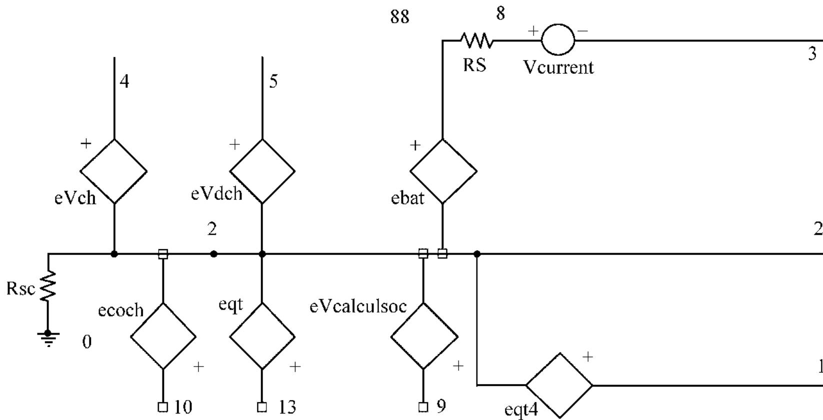


图 5-25　简化的蓄电池 PSpice 模型

5.4　习题

5.1　对一个由一个 PV 模块，一块蓄电池和两个负载组成的离网 PV 系统进行仿真，该离网系统的具体参数如下：

1）PV 模块：由 36 片太阳电池单元串联组成，$n_s=36$。最大功率 $p_{maxmr}=85\text{W}$，短路电流 $i_{scmr}=5\text{A}$，开路电压 $v_{ocmr}=22.3\text{V}$。

2）蓄电池：12V，由 6 个 2V 的蓄电池单元串联组成，$n_s=6$。电池容量 $SOC_m=576\text{Wh}$，初始荷电状态 $SOC_1=0.75$。

3）负载：由阻值分别是 90Ω 和 8Ω 的两个电阻并联组成。

将图 5-20 中 irrad2d. stl 文件所包含的光照度以及 20℃ 的恒定温度作为输入数据，利用本章描述的 PV 模块（module_ 1. lib）和蓄电池（bat. cir）的 PSpice 模型对上述离网系统进行仿真，观察蓄电池最终的 SOC，PV 模块传送给蓄电池和负载

的功率，以及蓄电池电流的变化过程。

5.2　对一个由 PV 太阳能发电组件，一块蓄电池和一个阻性负载组成的离网 PV 系统进行仿真，该系统具体参数如下：

1）PV 太阳能发电组件：由 4 块 PV 模块以 2 行 ×2 列组成，每块峰值功率为 85W，即 nsg = 2npg = 2。每个 PV 模块由 36 块太阳电池单元串联组成：短路电流：$i_{scmr}=5.2A$，开路电压 $v_{ocmr}=21.2V$。在标准条件下 PV 模块的最大功率点具有如下坐标：$i_{mmr}=4.9A$，$v_{mmr}=17.3V$。

2）蓄电池：24V，由 12 块 2V 的蓄电池单元串联而成，$n_s=12$。蓄电池容量 $SOC_m=984Wh$，初始充电状态 $SOC_1=0.6$。

3）负载：一个 6Ω 的电阻负载固定连接到蓄电池上。

将图 5-20 中 irrad2d.stl 文件所包含的光照度以及 22℃ 的恒定温度作为输入数据，利用本章描述的蓄电池（bat.cir）和 PV 太阳电池（generator_ beh.lib）的 PSpice 模型对上述离网系统进行仿真。观察蓄电池最终的 SOC，PV 模块传送给蓄电池和负载的功率，以及蓄电池电流的变化过程。

参考文献

[5.1] Yang, Y.C., and Gosbell, V.J., 'Realistic computer model of a DC machine for CADA topology on SPICE2', *PESC'88*, IEEE pp. 765–771, 1988.

[5.2] Wenham, S.R., Green, M., and Watt, M.E., 'Applied Photovoltaics Centre for Photovoltaic Devices and Systems, 1994.

[5.3] Schmitz, C., Rothert, M., Willer, B., and Knorr, R., 'State of charge and state of health determination for lead-acid batteries in PV power supply systems', *Proceedings of the IEEE 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Energy Conversion*, 2157–64. Vienna, Austria, July 1998.

[5.4] Casacca, M.A., and Salameh, Z.M., 'Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modelling techniques', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **7** (3), 442–6, September 1992.

[5.5] Lasnier, F., and Tang, T.G., *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Hilguer, 1990.

[5.6] Castañer, L., Aloy, R., and Carles, D., 'Photovoltaic system simulation using a standard electronic circuit simulator, *Progress in Photovoltaics*, **3**, 239–52, 1995.

第 6 章　功率调节器和逆变器的建模

摘要：在众多应用中，用于保护或控制的功率调节装置，如 DC – DC 变换器、充电调节器或 DC – AC 逆变器都是 PV 系统的一部分。本章的重点为介绍这些组件的模型，以简化对各种包括功率调节装置的 PV 系统结构的 PSpice 仿真。本章叙述的模型有不同程度的复杂性和仿真质量。

6.1　介绍

PV 模块供给系统的能量依据工作条件，特别是光照强度和温度，以及负荷性质而变化。PV 系统中的功率调节设备和电路无论为了保护还是降低损耗，目的都是要使 PV 发电的工作点尽可能接近最大功率点，从而优化能量的传递，使系统具有更高的效率。

充电调节器也被引入系统，以防止非正常条件工作，以及保护电池不要进入过充电或过放电状态。

本章介绍了一些功率调节元件，充电调节模块以及它们在 PV 系统中的工作特性。

6.2　阻流二极管

在缺乏光照的情况下，PV 模块的短路电流 I_{sc} 是零，并且模块的伏安特性与普通二极管近似，如图 6-1 所示，为一个理想模块和一个等效无穷大的电阻并联。

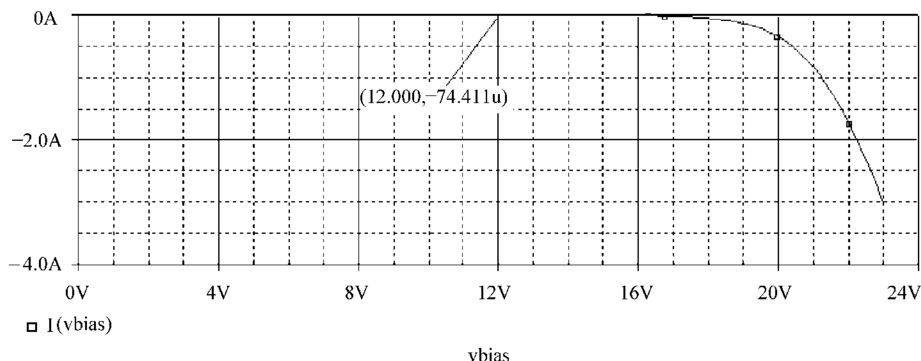


图 6-1　黑暗中 PV 发电装置的特性

在这样的环境下，PV 发电装置相当于一个附加到电池上的负载。根据第 5 章中 PV 系统电流特性方程（5-35），电池电流 I_{bat}的一部分可能流经 PV 模块。这种影响如图 6-1 所示，这部分的电池电流被称作 I（vbias）。图中光标显示了在缺乏光照的情况下 PV 模块连接到一个 12V 的蓄电池时流经 PV 模块的电流。这个影响可以通过在系统中加入一个阻断二极管来阻止。图 6-2 为一个由 PV 阵列和阻断二极管串连而成的 PV 系统。

需要注意以下事项：

1）串联二极管的存在意味着有一个 1V 左右管压降，该值的大小取决于二极管的型号和额定功率。

2）I_{mod}表示电流损失的大小，如图 6-2 所示，很大程度上依赖 PV 模块的等效并联电阻。尽管如此，根据实际 PV 模块的典型等效并联电阻值，I_{mod}的测量值应当非常小。

根据以上的讨论，在 PV 系统中是否使用阻断二极管作为安全保护必须加以慎重考虑，在一些情况下，特别是使用了充电调节元件时二极管不是必需的。在这种情况下，阻断二极管的保护作用将会被其后描述的调节元件所替代。

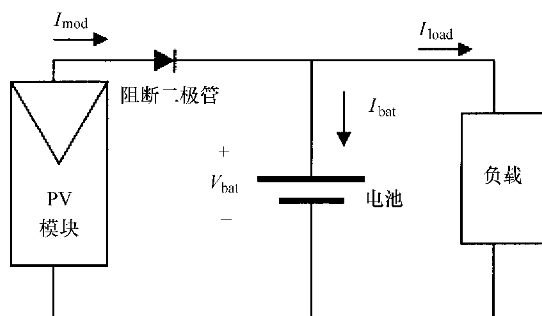


图 6-2　一个有阻断二极管的 PV 系统框图

6.3　充电调节

效率是任何功率调节系统的关键问题。因为能量流从输入到输出，强烈依赖的不仅仅是光照强度和温度，还有所有其他系统组件的工作状态，所以对能量流进行高效的管理以防止电池过充和过放变得非常重要。

经常用于电池充电管理的两类基本电子稳压器为并联调节器和串联调节器。

6.3.1　并联调节器

并联调节器并联到 PV 发电装置上，目的是转移蓄电池达到过充状态时所产生的额外能量。控制调节器动作输入信号的是蓄电池的电压，当该电压达到过充模式

的上限值时，会启动一条并联的电流回路。图 6-3 是这种调节器的典型结构图。

必须知道，$V_{control}$ 比过充模式的上限电压值低时，晶体管关断，I_{shunt} 为零。当 $V_{control}$ 达到上限电压值时，晶体管导通并且 I_{shunt} 变为正值，一部分 I_{mod} 分流到并联支路，用来限制 I_{bat} 和电池电压 V_{bat}。

如图 6-4 所示，$V_{control}$ 由一个简单的参考比较器产生，它以 V_{bat} 和上限参考值（图中 V_{ref}）作为输入，当电池电压低于参考值时，在输出端产生一个接近于比较器负供电电压的负信号；当电池电压高于参考值时，输出一个接近于正供电电压的正信号。

并联调节支路，由一个晶体管和一个电阻组成，其作用是消耗 PV 模块产生的额外功率，使之不传递到蓄电池。

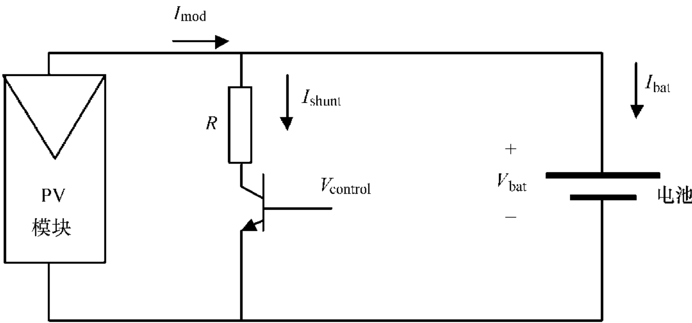


图 6-3　典型的并联调节器结构

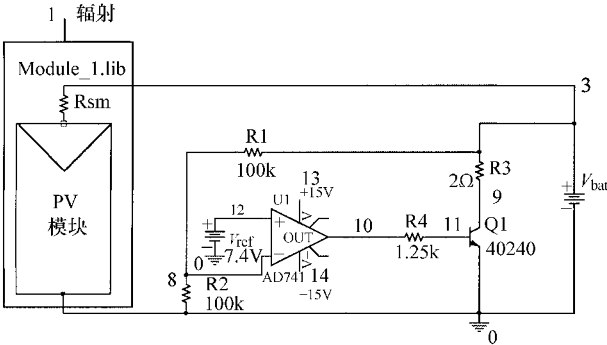


图 6-4　具有并联调节元件的 PV 系统

下面利用一个如图 6-4 所示的 PV 系统，作为一个并联调节的例子进行 PSpice 仿真。

该系统包含了一个 PV 模块，一个蓄电池，和一个由电压比较器、NPN 双极型晶体管，以及 4 个电阻所组成的并联调节电路。其中 R1 和 R2 作为分压电阻，比

较器负输入端产生一个与蓄电池电压成比例的电压，R3 和 R4 为功率电阻，其中 R4 与晶体管的集电极电路串联，R3 则串联到晶体管的基极。这两个电阻用于限制通过晶体管的电流。

例 6.1 为对图 6-4 中的电路进行仿真，运算放大器和晶体管的 PSpice 模型可以很容易在 PSpice 库中找到。

例 6.1 根据图 6-4 中的电路，写出电路的网络表文件并仿真其工作状态。其中 PV 模块由 36 个太阳电池串联组成，其短路电流为 5A，开路电压是 22.3V，并且在标准 AM1.5G 1kW/m^2的光照条件，温度 25℃下的最大功率为 85W。

电路中的蓄电池由 6 块 2V 电池串联而成，总容量为 1840Wh，并且在仿真开始时 SOC_n 的初始值为 0.75。

电池的额定电压值 $V_{bat}=12V$，并且假设当 $V_{bat}=14.8V$ 时，电池电压达到过充电电压最高值。假定系统的输入辐射条件由“irrad.stl”文件给出。为了简化问题，使环境温度恒定于 25℃。假定 PV 模块模型为第 4 章所述的“module 1.lib”。

解 开始写出网络表文件。

```
******** Example 6.1 netlist
****Module, shunt regulator and battery connection
xmodule 0 3 1 module_1 params:ta=25, iscmr=5, tr=25,
+vocmr=22.3,ns=36,np=1,nd=1,pmaxmr=85
.inc module_1.lib
xbat1 3 0 7 bat params: ns=6, SOCm=1240, k=.8, D=1e-5, SOC1=0.75
.inc bat.cir
R1 3 12 100000
R2 12 0 100000
R3 3 9 2
Q_Q1 9 11 0 Q40240
.model Q40240 npn
vref 8 0 dc 7.4
x741 12 8 13 14 10 ad741
.inc opamp.lib
R4 10 11 1250
vcc 13 0 dc 15
vee 14 0 dc -15
.inc irrad.stl
vmesur 1 0 stimulus Vgg
.tran 1s 130000s
.probe
.end
```

本例中的辐射条件是从真实检测数据中取得的，通过 irrad.stl 写入网络表中。图 6-5 为巴塞罗那（西班牙）四月份的两天的辐射数据图。

图 6-6 为电池组电压波形的仿真结果。可以看到由于并联调节器的作用，蓄电池电压 V（3）被限制在 14.8V。显示的 PV 模块的输出电压 V_1（xmodule.dl）是串联电阻 R_{sm}前面的节点电压（见图 6-4）。

如图 6-4 所示，运算放大器把 $V_{bat}/2$ 和恒定的基准电压 $V_{ref}=7.4V$ 做比较。当

V_{bat}达到 14.8V 的时候，进入过饱和状态，比较器输出正值，使由晶体管和 R_3 组成的并联支路导通。图 6-7 显示了流过这个并联支路的电流 $I(R_3)$ 的变化。

流入电池的电流被并联调节器的动作所限制。图 6-8 显示了 PV 模块的输出电流 I（xmodule. rs）和电池电流 I（xbat. vcurrent）。这两个电流的差值为由晶体管和 R_3 组成的调节器支路的电流，如图 6-8 所示。

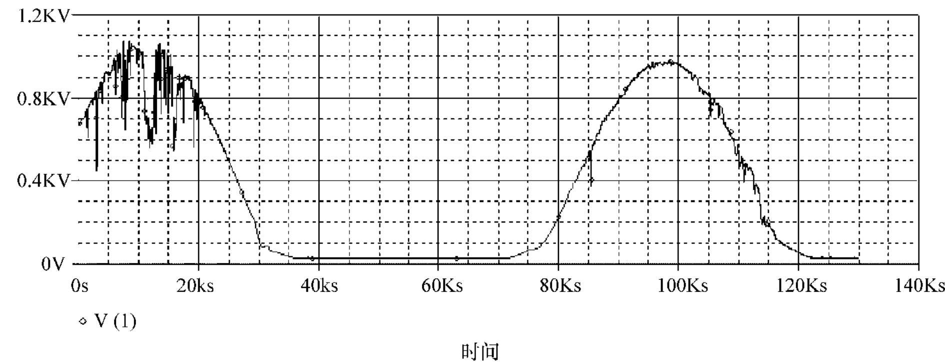


图 6-5　例子 6.1 中的辐射条件

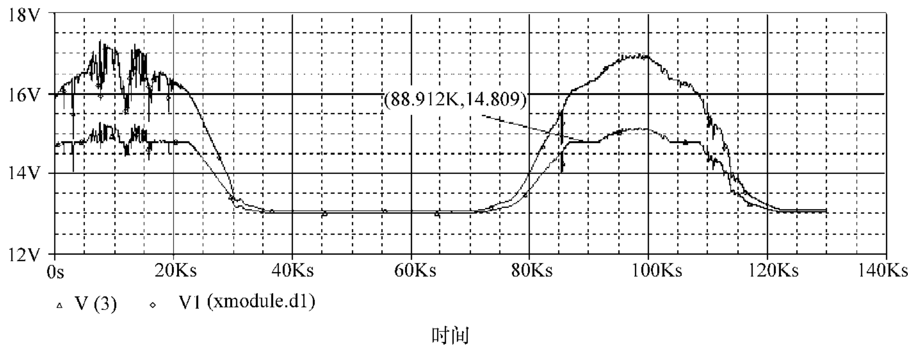


图 6-6　PV 模块电压（上）V1（xmodule. dl）和蓄电池电压 V（3）（下）的仿真结果

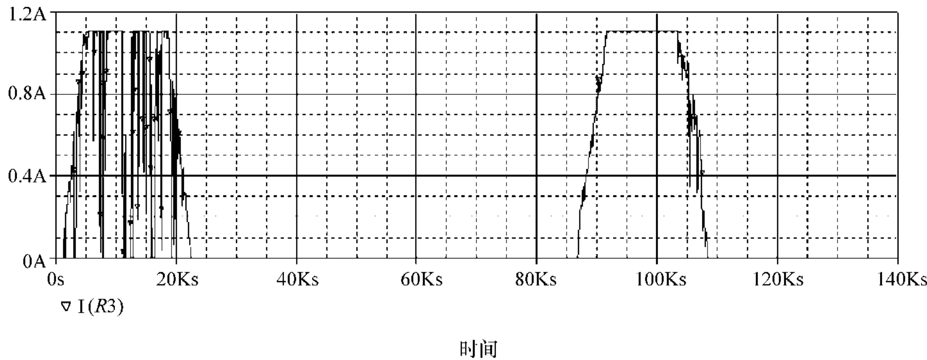


图 6-7　流过并联支路的电流 I（R_3）曲线

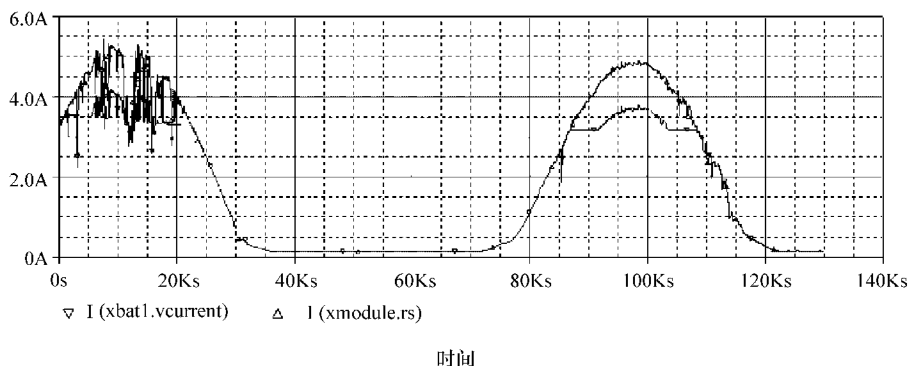


图 6-8 PV 发电装置的输出电流（上）I（xmodule. rs）和电池电流（下）I（xbat. vcurrent）

6.3.2 串联调节器

第二种调节方式是串联调节。目前大部分 PV 系统使用的充电调节器都是串联调节器[6.1]。图 6-9 所示为一个包含串联充电调节器的单独的 PV 系统的原理框图。

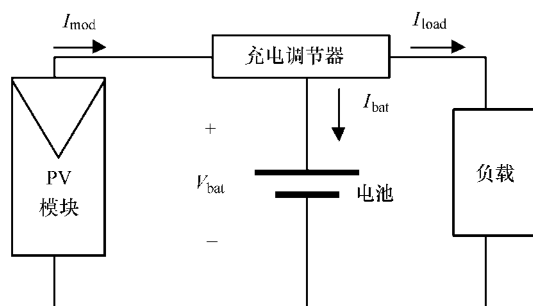


图 6-9 包含一个串联充电调节器的 PV 系统

如上所述，电池在推荐的工作电压区间的低电压（V_{min}）和高电压（V_{max}）之间工作在额定容量和额定功率。如果电池被迫工作在这个区间之外，则会产生不可恢复的损坏，或者不能正常工作。串联充电调节器可以防止电池工作在正常工作电压之外。

基本上，串联电荷控制器工作的方式，是当电池电压降低到 V_{min} 时断开负载，并且当电池再次充满电时连接负载电路，从而恢复输出电压。另一方面，当电池电压达到 V_{max}，即充满电时，充电调节器会断开电池与 PV 阵列的连接，并且在电池已经充分放电后立刻重新连接。

如图 6-10 所示，这个串联调节可以用标准的机电控制开关或者继电器轻松实现。表 6-1 为一个标称电压为 12V 的电池的例子。

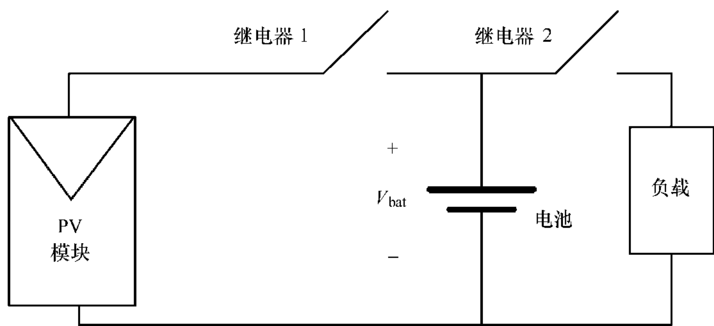


图 6-10　串联电荷控制使用图

表 6-1　开关的规定

继电器 1 电池到 PV 模块		继电器 2 电池到负载	
闭合 PV 模块连接	断开 PV 模块断开	断开 负载断开	闭合 负载连接
V_{bat} = 12. 8V	V_{max} = 13. 9V	V_{min} = 11V	V_{bat} = 12V

表 6-1 列出了期望的继电器 1 和 2 动作的电池电压；在这种情况下电池电压工作区间被限定在 V_{max} = 13. 9V 和 V_{min} = 11V 之间。

如图 6-11 所示，控制继电器开关的信号可以由两个滞环比较器电路很轻松地得到。

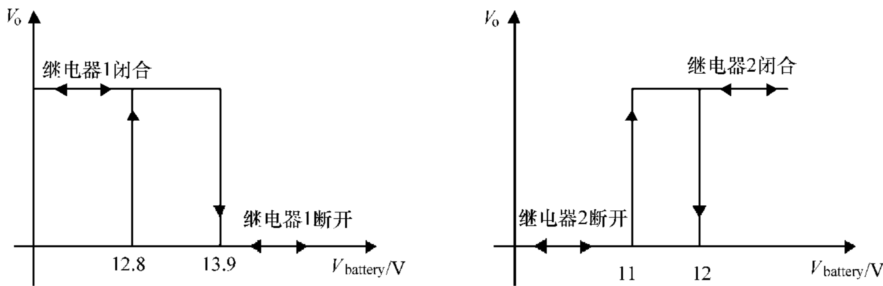


图 6-11　两个比较器的滞环区间

由于串联调节的性质，调节电路唯一的功率损失是继电器本身的损耗，该损坏

小于并联调节电路的电阻和晶体管的损耗。此时能量平衡在一定程度上被破坏，因为当电池开关开路时，由 PV 模块产生的一部分能量损失了。

例 6.2 阐述了这种充电控制策略。被仿真的系统是图 6-9 中的系统，但关注的核心是控制电池和 PV 模块之间的连接以及断开的开关 1 的动作。

例 6.2　一个铅酸蓄电池的特性如下：

1）初始荷电状态：$SOC_1 = 0.45$；

2）最大电荷状态：$SOC_m = 1000Wh$；

3）2V 电池的串联数量：$n_s = 6$；

4）$K = 0.8$，电池充放电效率；

5）$D = 1 \times 10^{-5}$，电池自放电率；

6）断开 PV 模块时的电池电压为 13.9V；

7）重新连接 PV 模块时的电池电压为 13.4V。

电池连接的 PV 模块由 36 个太阳电池串联组成，模块的特性如下：

1）短路电流，$i_{scmr} = 5A$；

2）开路电压，$v_{ocmr} = 22.3V$；

3）最大输出功率，$p_{maxr} = 85W$。

最后，一个 800Ω 的直流负载被固定连接到电池上。

使用图 6-12 所示的辐射条件作为输入数据，仿真 PV 系统特性。

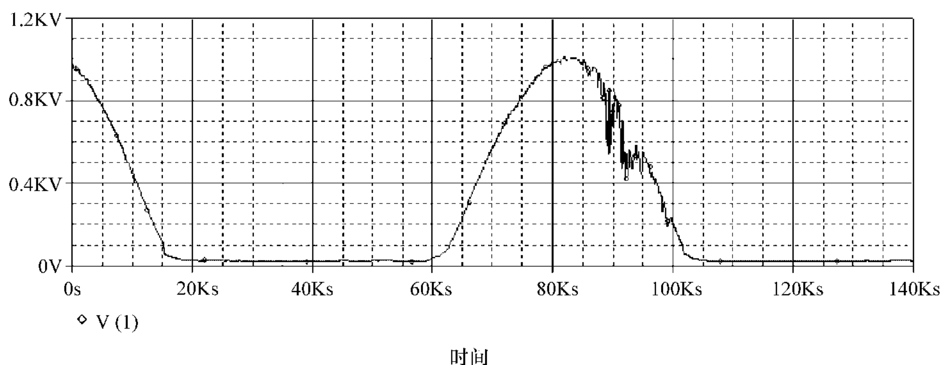


图 6-12　辐射数据

1）写出仿真上述包含串联调节器的 PV 系统的网络表。利用同相 Schmitt 触发器模拟开关控制。使用“Irrad. stlfile”的辐射条件作为输入。网络表如下：

```
** Example 6.2.cir
***** module, charge regulator and battery connection
xmodule  0  3  1  module_1  params:  iscmr-5,  tr-25,
+vocmr=22.3,ns=36,np=1,nd=1,pmaxmr=85, ta=25
.inc module_1.lib
.inc irrad.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad

xbat1 4 0 7 batstd params: ns-6, SOCm-1000, k-.8, D-1e-5, SOC1-.45
.inc batstd.cir
Rbat 4 0 800
R1 4 8 10000
R2 8 0 10000
x741 12 8 13 14 10 ad741
.inc opamp.lib
Vcc 13 0 dc 15
Vee 14 0 dc -15
vref 16 0 dc 6.8
R6 12 16 4100
R7 12 100 220000
Wch 3 4 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff--10e-5, ion-10e-6, Roff-1.0e-8, Ron-0.01)
vcurrent 10 100 dc 0
.tran 1s 140000s
.probe
.end
```

2）画出 PV 模块输出电压曲线。如图 6-13 所示，在 PV 阵列输出节点 V（3）得到结果。

3）画出电池电压曲线，显示出开通和断开的电压值。结果如图 6-14 所示，可以看到，一旦电压达到 V_{max} 就开始下降，PV 阵列保持与电池断开直到达到重新连接的电压。

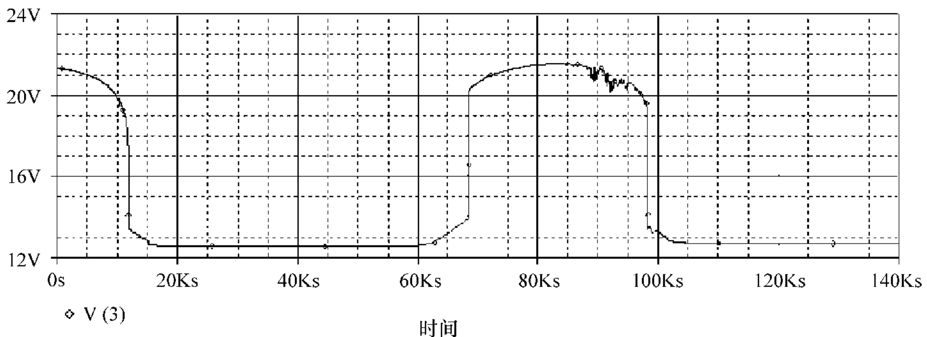


图 6-13　PV 发电装置输出电压

注：夜间最小电压为电池电压。

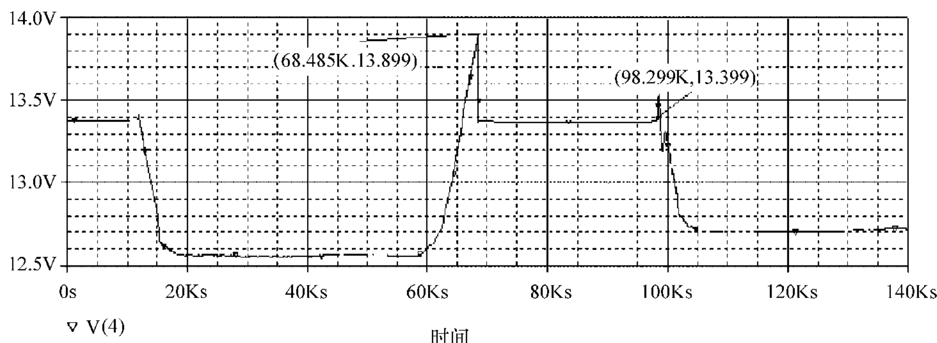


图 6-14　电池电压

6.4　最大功率点跟踪

为了达到从发电装置到负载的最佳功率传输，PV 发电装置和负载都必须保持在各自的最佳工作条件上。当然，最大功率点是 PV 发电装置的目标工作点，这是最大功率跟踪（MPPT）控制电路的主要任务。

这些电路在一些特定负载条件下是非常有用的，比如负载为白天工作的直流电动机，或者是在异常或极端条件下工作，寿命会被严重缩短的负载，比如正在抽水的水泵。

最大功率点跟踪器基本上都是 DC－DC 变换器，可以用如图 6-15 所示模型来描述。DC－DC 变换器的输入功率为：

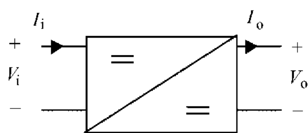


图 6-15　DC－DC 变换器示意图

$$P_i = V_i I_i \tag{6-1}$$

变换器输出的功率为：

$$P_o = V_o I_o \tag{6-2}$$

输入和输出功率的关系定义了逆变器的效率 η，为

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \tag{6-3}$$

在 DC－DC 跟踪器中，DC－DC 变换器的输入阻抗必须按使 PV 发电装置工作在最大功率点进行选择。DC－DC 变换器的输出也必须适应于特定的负载特性。DC－DC 变换器可以在输入为额定的固定直流电压时输出可变的直流电压。依据负载要求，输出电压 V_o 可以低于或高于输入电压 V_i。因此，DC－DC 变换器可被分为两种基本类型：

1）降压器，也称降压或 Buck 变换器；

2）升压器，也称升压或 Boost 变换器。

其他类型的 DC－DC 变换器包括全桥 DC－DC 变换器、Cúk DC－DC 变换器、Buck－Boost 变换器，该变换器可以使用在有特殊要求的情况[6.2~6.5]，主要用于需要

负极性输出，输出电压可以高于也可以低于输入电压，或者直流电机传动等场合。过去的几年里，电力电子技术发展出许多可以使用在 PV 系统中的高性能变换器。

图 6-16 给出了在 PV 发电装置和负载之间接有 DC – DC 变换器的 PV 系统框图。

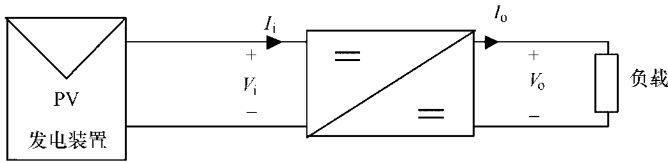


图 6-16　连接 DC – DC 变换器的 PV 系统框图

6.4.1　基于 DC – DC 降压变换器的 MPPT

降压电路的基本原理图如图 6-17 所示。通过开关打开和接入输入回路，在二极管 D1 的阴极得到波形为矩形的电压波形，之后经过 LC 高效滤波器在输出端产生一个等于矩形波平均值的近似的连续电压。当开关断开时，二极管 D1 负极被强制为低电压，为电感电流提供了返回通路。矩形波的平均值可以通过控制开关的 ON 和 OFF 状态长度（t_{on}和 t_{off}）来进行调节。

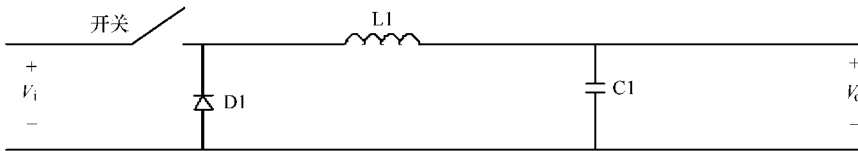


图 6-17　Buck 变换器原理图

开关的控制信号通常有一个不变的时间周期 T，占空比 Dc 是可变的，定义为：

$$\mathrm{Dc} = \frac{t_{on}}{T} \tag{6-4}$$

当开关闭合时，电流流过电感，二极管反偏，电感储存能量。当开关断开时，电感电流迫使二极管在 t_{off}时间段导通。假定开关是理想开关，瞬时输入电压为 V_i，变换器负载为纯阻性负载，平均输出电压 V_o 为：

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^{t_{on}} V_i(t)\,\mathrm{d}t = \mathrm{Dc}V_i \tag{6-5}$$

因为占空比小于 1，式（6-5）的结果表明 $V_o < V_i$。变换器输出电压可以通过选择合适的占空比调节到设定值。因为理想 DC – DC 变换器没有功率损耗，效率 $\eta = 1$，所以输出功率一定等于输入功率。

$$P_i = P_o \tag{6-6}$$

$$V_i I_i = V_o I_o \tag{6-7}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \mathrm{Dc} = \frac{I_i}{I_o} \tag{6-8}$$

PV 系统中，DC – DC Buck 变换器通常被用作直流电源，在输入电压 V_i 因为温度和辐射条件变化而变化时，输出电压 V_o 保持恒定。可以通过调整占空比使

DC－DC 变换器输入电压一直保持在 PV 发电装置的最大功率点电压。

6.4.2　基于 DC－DC 升压变换器的 MPPT

升压型 DC－DC 变换器也使用在 PV 系统中，特别是为电池充电时。升压变换器的基本原理电路如图 6-18 所示。可以看到，升压变换器的组成元件和降压变换器相同，但排列不同。开关同样由一个包含不变的时间周期 T 和可变的占空比 Dc 的控制信号控制。

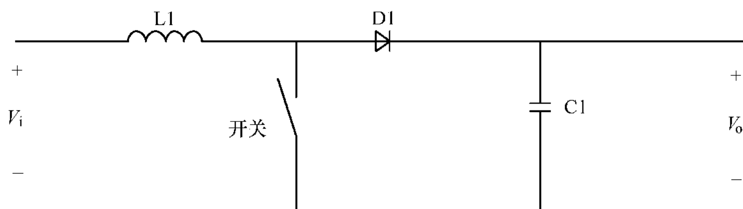


图 6-18　Boost 变换器原理图

在这个变换器中，输出电压 V_o 总是大于输入电压 V_i。当开关闭合时，二极管反偏，只有电容与负载相连，电感从输入端储存能量。有：

$$V_i = L\frac{di_L}{dt} \tag{6-9}$$

式中，i_L是电感电流。通常变换器的开关频率远大于输入、输出变化的频率，所以式（6-9）可以转化为

$$i_L(t_{on}) - i_L(0) = t_{on}\frac{V_i}{L} \tag{6-10}$$

当开关关断，二极管导通，能量从输入和电感传导到输出电容和负载时，有：

$$V_i - V_o = L\frac{di_L}{dt} \tag{6-11}$$

$$i_L(T) - i_L(t_{on}) = t_{off}\frac{V_i - V_o}{L} \tag{6-12}$$

考虑到电感电流的周期连续性：

$$\frac{V_i}{L}t_{on} = \frac{V_i - V_o}{L}t_{off} \tag{6-13}$$

最终得到输入、输出电压的关系为占空比 Dc 的函数：

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-\text{Dc}} \tag{6-14}$$

因为理想 DC－DC 变换器没有功率损耗，所以效率 $\eta = 1$，输出功率一定等于输入功率：

$$P_i = P_o \tag{6-15}$$

$$V_iI_i = V_oI_o \tag{6-16}$$

$$\frac{I_o}{I_i} = (1-\text{Dc}) \tag{6-17}$$

同降压变换器一样，可以通过依据输出电压 V_o 的占空比调整使 DC－DC 变换器输入电压 V_i 一直保持在 PV 发电装置的最大功率点电压。

当 DC－DC 变换器工作在最大功率点时，不管是 Buck 还是 Boost，必须有一个合适的控制信号来控制开关的状态。一般这个信号由脉宽调制（PWM）技术产生，再给变换器增加一个控制电路来产生控制信号[6.5]。控制电路必须通过调整控制波形的占空比使其为 DC－DC 变换器输入功率的函数，以实现最大功率点跟踪。

6.4.3 MPPT PSpice 行为模型

前几节中描述了 DC－DC 变换器的基本操作，是按照每一个时钟信号周期的仿真，提供一个电子学的准确、低损耗的设计，但是对 PV 系统运行来说基本没有用处，因为 PV 工程师更关心的是系统的长期行为特性。

这就是为什么用于 DC－DC 变换器，不管是 Buck 还是 Boost 的简单 PSpice 行为模型不是基于变换器的拓扑结构，而是根据输入、输出关系和工作原理建模，从而实现正确的 PV 发电装置最大功率点跟踪和优化电力负荷的需求。

图 6-19 为利用三条 iso 功率曲线描述的 PV 模块的伏安特性：

1）曲线 A 在最大功率点与伏安特性曲线相切，对应功率值为 P_{max} 的 iso 功率曲线。

2）曲线 B 是功率值大于 P_{max} 的 iso 功率曲线。

3）曲线 C 是功率值小于 P_{max} 的 iso 功率曲线。

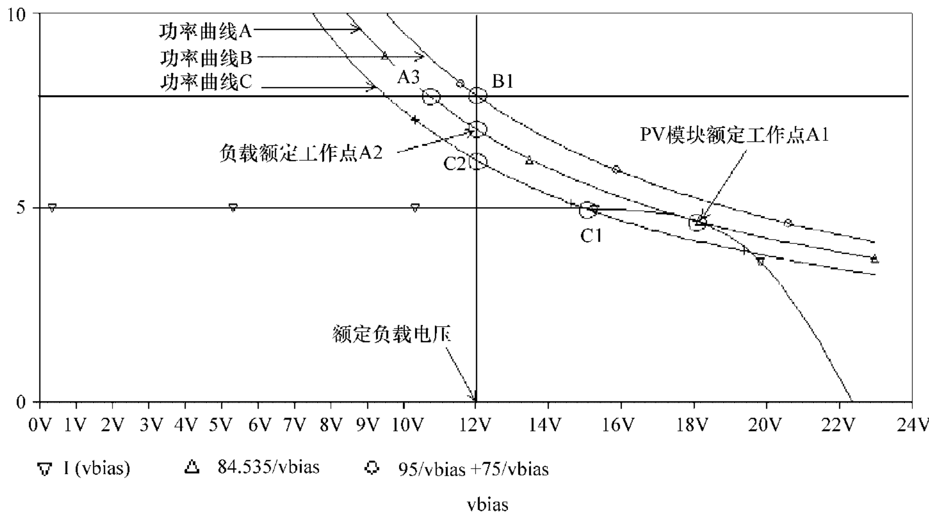


图 6-19　PV 模块和负载的工作点

PV 模块在采用有效率为 100% 的 MPPT 追踪时的额定工作点如图 6-19 所示，其中点 A1 为模块最大功率点；点 A2 为负载在额定负载电压时的工作点。

如果系统仅由 PV 模块、DC－DC 变换器和负载构成，对于一个采用效率为 100% 的 DC－DC 变换器的电路而言，为了在给定辐射条件下实现能量平衡，其额

定工况必须满足曲线 A 的要求。

设想一个新的情况，辐射度和温度都不变，只是负载需要的功率大于 PV 模块最大功率点的功率。如果要满足输出的电流需要，负载的工作点将会移动到点 A3，输出电压不能维持原电压，而变成比标称电压低的电压（也可以相反的方式：电压不变，降低电流）。

相反，如果负载需要的功率小于 P_{max}（曲线 C），那么模块最大功率点不能维持，工作点移动到点 C1，负载工作在点 C2。

实际中，图 6-19 所示的情况只会发生在 PV 发电装置与负载之间只经过一个 DC – DC 最大功率点跟踪器相连的系统中，例如水泵系统。在其他有能量存储的 PV 系统，如孤岛系统（电池）或并网系统（电网），负载和 PV 模块的工作点为：

状态 B 对应曲线 B，负载工作点为 B1，PV 模块工作点为 A1；

状态 C 对应曲线 C，负载工作点为 C2，PV 模块工作点为 A1。

这两种情况下，DC – DC 变换器效率没有意义，状态 C 时 PV 模块发出的额外的能量被存储到电池或输入电网中，状态 B 时不足的能量从存储设备抽取。

为了说明图 6-19 的特性，提出了如图 6-20 所示的 PSpice 模型。相应的网络表如下：

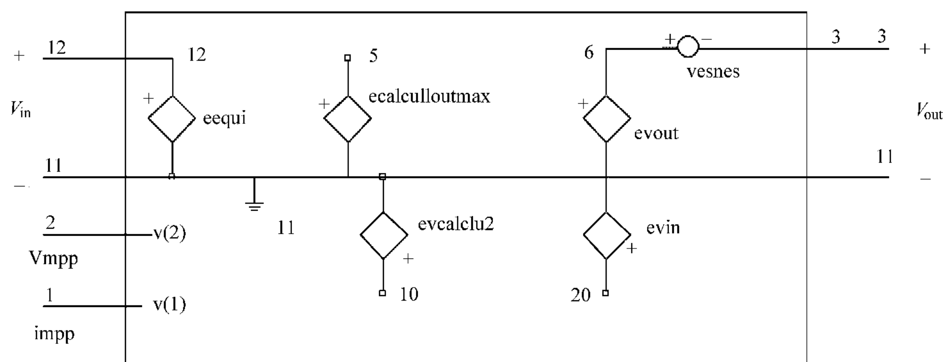


图 6-20　一种 PSpice DC – DC 变换器模型原理图

```
**** dcdcf.cir
**** DC/CD converter
.subckt dcdcf 11 12 1 2 3 params: n=1, vo1=1
eequi 12 11 value={v(20)}
evin 20 11 value={IF (v(10)-v(5)>0, v(2), vo1*v(10)/(n*v(1)))}
**** power control
ecalculIoutmax 5 11 value={n*v(1)*v(2)/vo1}
vsense 6 3 dc 0
evcalcul2 10 11 value={i(vsense)}
evout 6 11 value={IF (v(10)-v(5)>0, (n*v(1)*v(2)/v(10)), vo1)}
.ends dcdcf
```

可以看到，变换器被定义为一个子电路，有 n 和 v_{o1} 两个输入参数，定义为：

1）n 是变换器效率，定义见式（6-3）；

2）v_{o1} 是期望变换器输出的电压。

子电路有 5 个节点，如图 6-20 和图 6-21 所示。

1）节点 11：地；

2）节点 12：变换器输入；

3）节点 1：输入，PV 发电装置工作在最大功率点的电流 i_{mmp}；

4）节点 2：输入，PV 发电装置工作在最大功率点的电压；

5）节点 3：变换器输出。

节点 1 和节点 2 向 DC－DC 变换器输入 PV 发电装置在最大功率点的瞬时值。根据上述数据，DC－DC 变换器的行为模型通过一个连接到发电装置输出节点 12 的压控电压源 eequi 进行适当的最大功率点跟踪。这个电压源直接由节点 20 控制。节点 20 的电压由控制电压源 evin 根据 DC－DC 变换器的输出功率需要和由图 6-19 所示的规则决定的变流器效率进行控制，进而将上述的 PV 模块工作点移动到 C2 或是保持在 A1。

在变换器模型输出端放置另一个压控电压源 evout，支路节点为 6。

在节点 6 和变换器输出节点 3 之间，放置了一个电压源 vsense 来检测输出电流 i（vsense）。为了实现该功能，DC－DC 变换器行为模型要计算输出最大可用电流，需要以下参数：

1）变换器效率 n；

2）期望输出电压 v_{o1}；

3）输入端的有效功率，假定 MPP 点满足：$P_i = V_{mM} I_{mM}$。

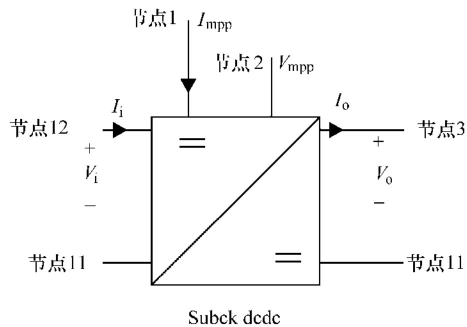


图 6-21　PSpice DC－DC 变换器模型的节点

这个计算通过包含子电路节点 5 的电子程序 ecalculIoutmax 来实现。通过 if 语句实现比较：如果负载需要的电流小于程序计算出的最大电流，则输出电压置为期望值 v_{o1}；反之，则电压被限制为：

$$\frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{load}} n \qquad (6\text{-}18)$$

这个负载功率控制策略在 PSpice 网络表中定义如下：

```
ecalculIoutmax 5 11 value={n*(v(1)/1000)*v(2)/vo1}; calculates the maximum
*available output current
vsense 6 3 dc 0; zero voltage ancillary voltage source to sense the load current value
evcalcul2 10 11 value={i(vsense)}
evout 6 11 value={IF (v(10)-v(5)>0, (n*v(1)*v(2)/v(10)), vo1)}
```

这里最后一行代码根据 v（5）和 v（10）的相对大小决定输出电压是 v_{o1} 还是式（6-18）的值。

例 6.3 展示了本节所述的 DC – DC 变换器模型的用途。

例 6.3　假设一个 PV 系统由一个 PV 发电装置，带有最大功率点跟踪的 DC – DC 变换器，及负载构成，如图 6-16 所示。

PV 模块由 36 个太阳电池串联组成，模块特性为：

1）短路电流 $i_{scmr}=5.2A$；

2）开路电压 $v_{ocmr}=21.2V$；

3）最大输出功率 $p_{maxr}=85W$；

4）标准情况下最大功率点坐标：$I_{mppr}=4.9A$，$V_{mppr}=17.3V$。

DC – DC 变换器是效率为 100% 的理想变换器，期望输出电压为 $V_{o1}=12V$。最后一个 40Ω 的 DC 负载恒定连接到 DC – DC 变换器输出端。假设 PV 系统特性仿真的输入条件为“irrad. stl”文件给出且环境温度恒定为 25℃，则辐射曲线如图 6-22 所示。

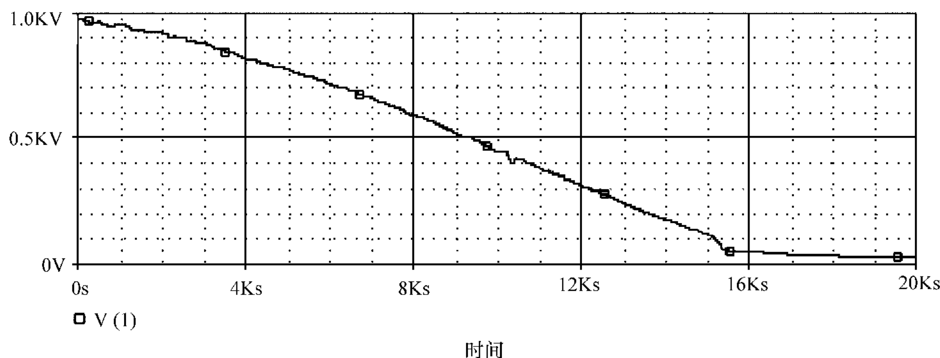


图 6-22　辐射曲线

1）使用本章中描述的 PV 模块和 DC – DC 变换器对应的子电路，写出上述 PV 系统的 PSpice 网络表如下：

```
* ppm.cir
.inc generator_beh.lib
xgen 0 1 2 3 405 406 407 20 30 generator_beh params:
-iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
-noct_47,immr_4.9, vmmr_17.3, tr_25, ns_36, nsg_1, npg_1
vtemp 2 0 dc 25
.inc irrad.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
.inc dcdcf.cir
xconv 0 3 20 30 40 dcdcf params: n=1, vo1=12
Rload 40 0 5
.tran 1s 20000s
.probe
.end
```

其中，在 25℃的恒定环境温度条件下使用第 4 章的子电路模型 generator_ beh. lib，还使用了效率为 100%、输出标称电压为 12V 的 DC – DC 变换器模型。

2）根据上述网络表，画出 PV 系统的原理框图，显示和其他模块的连接。原理框图如图 6-23 所示。

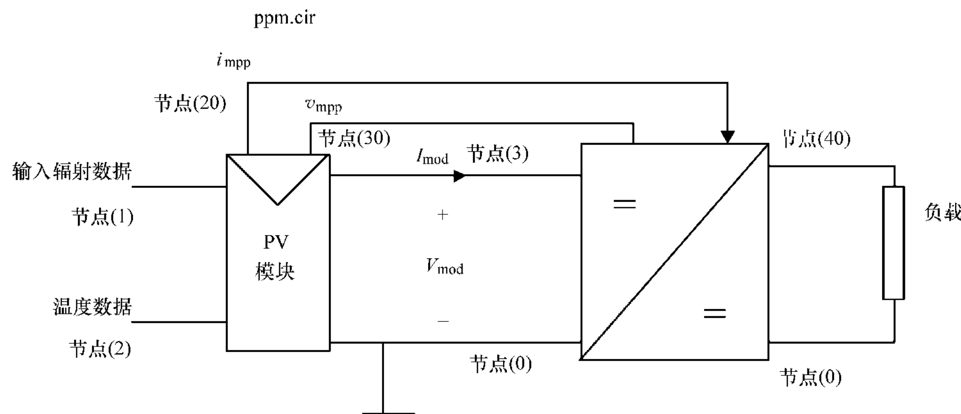


图 6-23　例 6.3 的原理框图

3）画出以下仿真结果：

① PV 模块输出电压（节点 3）；

② PV 模块输出电流，流入 DC – DC 变换器的电流（节点 3）。

比较以下结果和仿真结果：

① v_{mpp}，PV 模块最大功率点电压（节点 30）；

② i_{mpp}，PV 模块最大功率点电流 v（20）。

结果显示在图 6-24 和图 6-25 中。

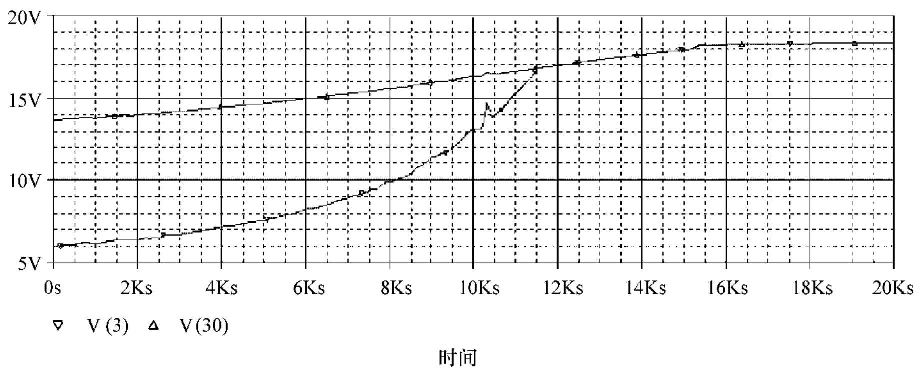


图 6-24　DC – DC 变换器输入电压

注：下方曲线，即 PV 模块输出电压 v（3）和 PV 模块最大功率点电压［上方曲线，v（30）］变化。

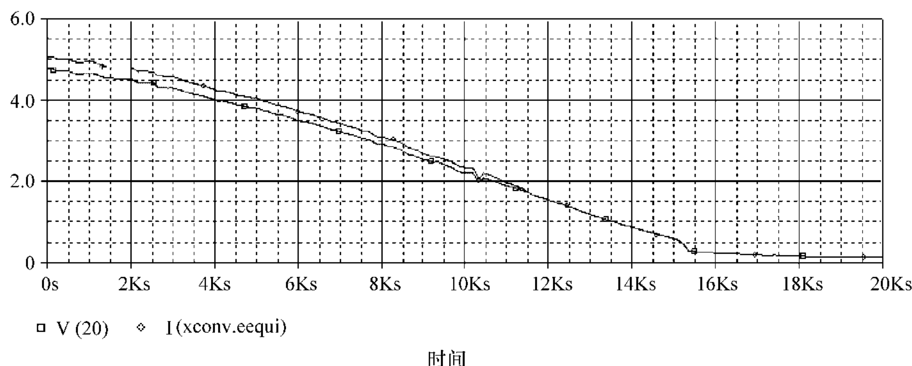


图 6-25　DC－DC 变换器输入电流 I（xconv. eequi）

注：上方曲线，即 PV 模块输出电流和 PV 模块最大功率点电流［下方曲线，v（20）］变化。

从图中可以看到：DC－DC 变换器保证了正确的最大功率点追踪，迫使 PV 系统在条件允许时，即变换器的输出功率足够大时，工作在最大功率点。

4）画出 P_i 和 P_o 的值，分别为 DC－DC 变换器的输入功率和输送到负载的功率。

如图 6-26 所示，可以看到，该 DC－DC 变换器当输入功率足够大时提供恒功率负载。当负载需要的功率超过可用功率时，输出功率被变换器限制。这种效应也可以通过观察供给负载的电流和 DC－DC 变换器的输出电压图得到，如图 6-27 所示。

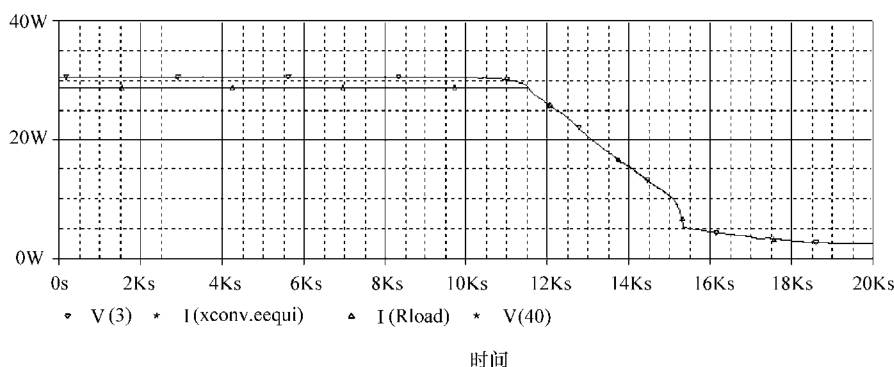


图 6-26　DC－DC 变换器的输入（上）和输出（下）功率

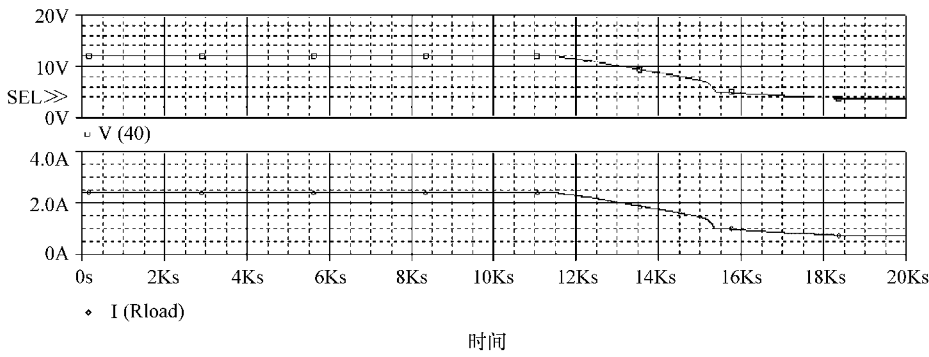


图 6-27 DC – DC 变换器的输出到负载的电压（上）和电流（下）

6.5 逆变器

逆变器是把 DC 信号转换成 AC 信号的一种电力电子电路。当它被应用到 PV 系统中时，PV 发电装置产生的直流电被转变成交流电。图 6-28 是逆变器的原理图，其输入输出的大小已经定义。

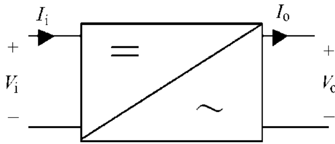


图 6-28 逆变器或 DC – AC 变换器的原理图

交流电在 PV 系统中是必要的，因为多数常规负载是交流负载，例如家用电器或者交流电动机。不仅如此，许多 PV 系统都是与电网相连的，因此一个完整系统的输出能量应该是交流的。逆变器是整个系统的关键组件。

下面是逆变器的一些重要性能指标：

1）输入电压范围：逆变器正常运行可接受的直流电压输入范围。

2）额定和最大输出功率：逆变器可以输送给负载的额定和最大交流输出功率值。

图 6-29 展示了一些典型的逆变器指标，来自制造商的数据手册，其中交流输出功率被描述成直流输入电压的函数。可以看到，输出功率随着直流输入的增长而增长，直到达到最大输出功率，之后尽管直流输入还在增大，但是逆变器输出功率保持一个定值。

随着输出功率趋于饱和，相应的输入特性为：直流输入的电流减小，如图6-30 所示，说明逆变器输入端的直流功率近似保持恒定。

总谐波失真率（THD）的定义是，除基波以外的其他谐波信号的均方根值（rms）与基波均方根值的比值。

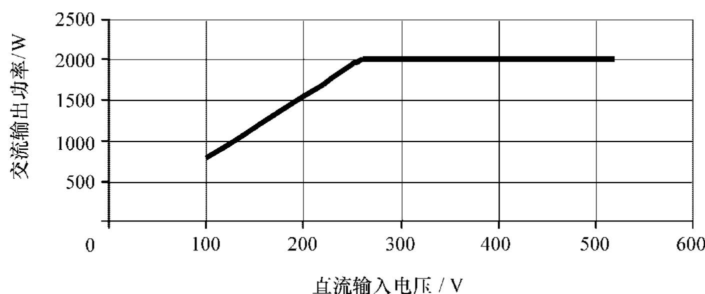


图 6-29　逆变器的典型输入输出特性

$$\mathrm{THD}=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}V_n^2}}{V_1} \tag{6-19}$$

式中，V_1是基波的均方根值，V_n是第 N 次谐波的均方根值。

逆变器效率的定义是，输出功率的均方根值，与直流输入功率的均方根值的比值，即：

$$\eta=\frac{P_{\mathrm{AC}}}{P_{\mathrm{DC}}} \tag{6-20}$$

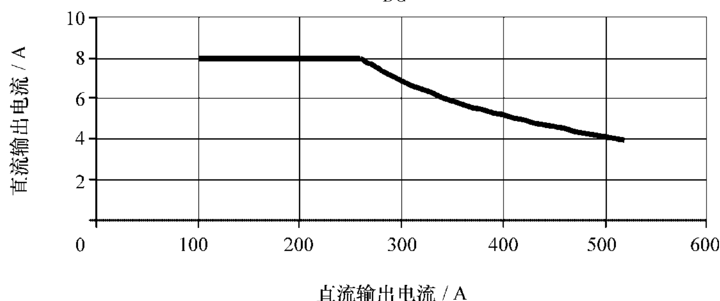


图 6-30　逆变器的典型输入特性

图 6-31 为一个典型的逆变器效率图，来自于商业数据表，是一个逆变器输出交流功率的函数。输出交流功率通常用% 来表示，交流输出功率使用逆变器的额定交流输出功率进行归一化。

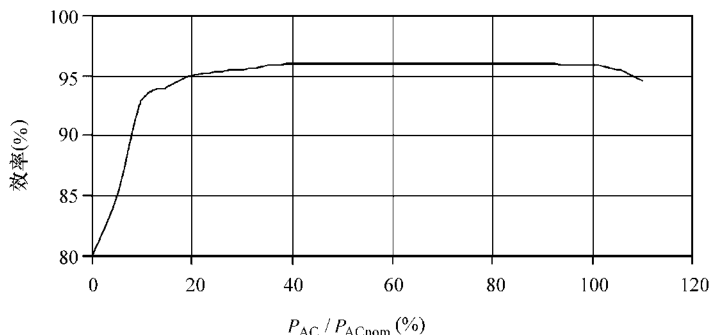


图 6-31　逆变器的典型效率特性

逆变器必须满足很高的标准；公共电网主体对电压标称值和频率的偏差范围有着严格的要求。导致了大多数市场上逆变器的总谐波畸变水平低于 3%，并且效率范围为 90% ~96%。

许多不同类型的逆变器都带有不同的特征、性能。逆变器可以以下几种形式进行分类：

1）按逆变器输出分为单相或者三相的逆变器。

2）按开关工作原理分为线性换向逆变器，如逆变器内部的开关器件晶闸管受电网控制；及使用自控功率开关的自换相逆变器。

3）按逆变器的额定功率分类。

一个更普遍的逆变器分类是根据逆变器的内部拓扑来分的。按照这个标准，逆变器可以被分成三大类：

1）脉冲宽度调制（PWM）逆变器。PWM 逆变器是最贵的逆变器，但是它们在谐波畸变以及效率方面有着最好的性能。典型的效率值是 90% ~97%，THD 值小于 3%。

2）方波逆变器。这种逆变器都包含固态器件，比如说，作为开关器件的功率双极晶体管或 MOSFET，其作用是将输入的直流源转换为逆变器输出的方波。这可以通过不同的电路拓扑结构[6.5~6.6]和适当控制开关动作来实现。图 6-32 所示为一种最典型的逆变器拓扑，当对晶体管的基极电压进行适当控制时，其负载 R_1 两端的输出电压 V_0 呈现方波信号。

大多数逆变器的输出端都有一个变压器，以提高电压到期望的幅值。方波逆变器通常是最便宜的，因为它结构简单，有着良好的效率范围，约 75% ~95%，其缺点为 THD 差，最高能到 45%。

3）改进的正弦逆变器。这种逆变器将上一种开关控制策略和谐振电路相结合，来实现一个接近正弦波的逆变器输出；其性能介于两种类型之间。一般其效率为 70% ~80%，THD 水平约为 5%。

6.5.1 逆变器拓扑的 PSpice 模型

在参考文献［6.5］、［6.6］中，可以发现多种逆变器的 PSpice 模型。这些模型是根据逆变器的内部结构和前面所述的逆变器分类构造的。为了描述一个逆变器的内部工作过程，我们将对最普遍的一种，即在大多数电力电子书中称作经典桥式拓扑为例进行仿真，如图 6-32 所示。读者可以查阅参考文献［6.4］，里面有这种逆变器的 PSpice 网络表。我们修正了经典桥式结构的参数值，使之能够满足 PV 系统中的应用。特别是例 6.4 是一个工作在电网频率的低频逆变器，以分析逆变器的输出端没有变压器时的输出信号。事实上，这种设计是造成许多逆变器效率损失的主要原因，并且会直接造成电感电容元件的重量和体积很大。为了避免这些问题，提高效率以及减小逆变器的尺寸，在现在的设计中，逆变器的频率通常会大于电网频率几个数量级。

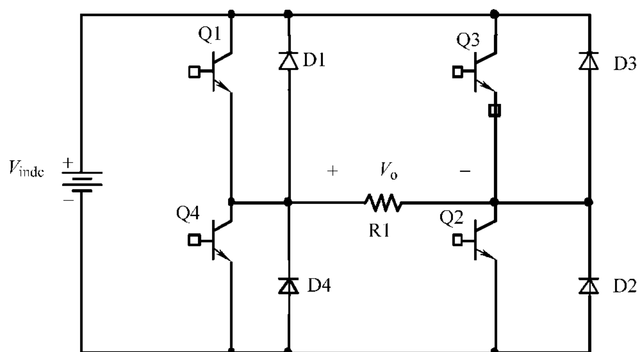


图 6-32　方波逆变器的传统原理图

例 6.4　图 6-33 所示的电路中，采用了四个双极功率晶体管 Q2N3055。其模型来自 PSpice 的 evaluation 库。同时还有 4 个二极管，使用默认模型 d，其渡越时间 $tt=1\mu s$。假设负载是一个 4Ω 电阻，并且串联一个电容和一个电感，并且输入为 24V 的直流电源。

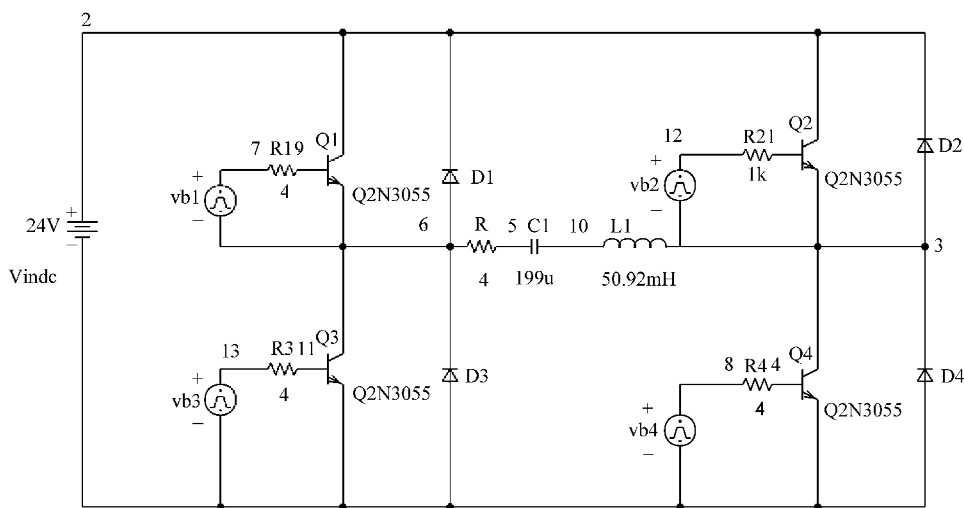


图 6-33　RLC 负载的逆变器原理图

1）当 RLC 电路的品质因数为 Q = 6.35，谐振频率为 50Hz 时，计算电感 L 的值。

解　Q 依赖于电阻值以及谐振频率：

$$Q = L\frac{2\pi fr}{R}$$

得到：

$$L = 50.92\text{mH}$$

2）通过谐振频率值计算电容 C 的值。

解　谐振频率依赖于电感和电容值：

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

得到：

$$C = 199\mu\text{F}$$

3）写出 PSpice 网络表文件。进行时间为 1s 的瞬态仿真，并对输出电流的傅里叶分析，基波频率为 50Hz，谐波到 12 次。

解　注意傅里叶分析的语句为：

. FOUR fund_ freq harm_ number variable_ 1 variable_ 2

其中，fund_ freq 是基波频率；

harm_ number 是计算的谐波次数；

variable_ 1 etc. 是被执行傅里叶分析的变量。

网络表如下：

```
*** inverter 1.cir
vindc  2  0  24v
q1  2  9  6  q2n3055
d1  6  2  diode
r1  9  7  4
vb1  7  6  pulse 0 14  0  1ps 1ps 9.9ms  20ms

q2  2  1  3  q2n3055
d2  3  2  diode
r2  12  1  4
vb2  12  3  pulse 0 14 10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

q3  6  11  0  q2n3055
r3  11  13  4
d3  0  6  diode
vb3  13  0  pulse 0 14 10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

q4  3  4  0  q2n3055
d4  0  3  diode
r4  8  4  4
vb4  8  0  pulse 0 14 0 1ps 1ps 9.9ms 20ms

r  6  5  4
c  10  5  199uf
l  3  10  50.92mh
.model diode d(t=1e-6)
.model q2n3055 npn
.tran  1ms  1
.four  50hz  12  i(r)  v(6,3)
.options abstol=0.5ma reltol=0.01 vntol=0.001v
.probe
.end
```

图 6-33 重现了上述网络表描述的原理图，Vb1 ~ Vb4 是控制开关 Q1 ~ Q4 的脉冲电压源，Q1 和 Q4 在 Q2 和 Q3 关闭时开通半个周期。相反的，后半个周期 Q1 和 Q4 关闭，Q2 和 Q3 开通。

4）画出输出电压波形。

解　图 6-34 为输出电压 V_o 的波形，其中 $V_o = V(3) - V(6)$。可以看到波形是一个周期为 20ms，幅度为 23.9V 的方波。这是因为晶体管的开关特性：导通时相当于短路，断开时相当于开路。

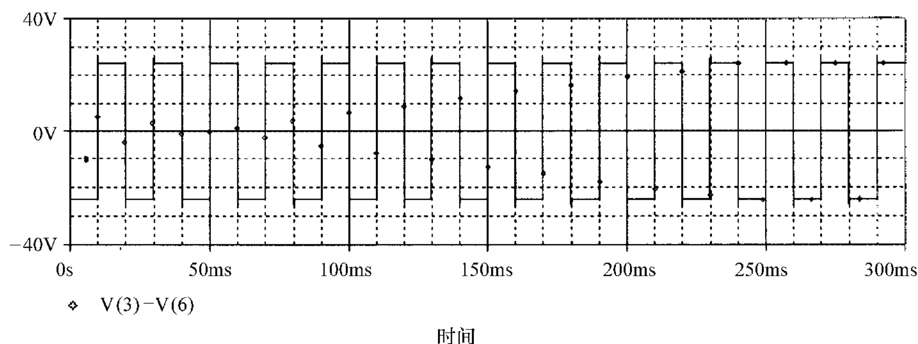


图 6-34　例 6.4 的逆变器输出电压波形

5）计算电压波形的总谐波失真。

解　结果可以直接从仿真输出文件中得到，如下所示：

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(6,3)
DC COMPONENT = −3.177885E − 05

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.048E+01	1.000E+00	1.969E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	6.319E−05	2.073E−06	−8.596E+01	−8.793E+01
3	1.500E+02	1.019E+01	3.343E−01	5.825E+00	3.856E+00
4	2.000E+02	5.935E−05	1.947E−06	−8.905E+01	−9.102E+01
5	2.500E+02	6.139E+00	2.014E−01	9.652E+00	7.683E+00
6	3.000E+02	6.413E−05	2.104E−06	−9.104E+01	−9.300E+01
7	3.500E+02	4.411E+00	1.447E−01	1.349E+01	1.152E+01
8	4.000E+02	6.280E−05	2.060E−06	−9.070E+01	−9.267E+01
9	4.500E+02	3.457E+00	1.134E−01	1.730E+01	1.533E+01
10	5.000E+02	6.461E−05	2.120E−06	−8.828E+01	−9.025E+01
11	5.500E+02	2.854E+00	9.364E−02	2.111E+01	1.914E+01
12	6.000E+02	6.397E−05	2.099E−06	−8.992E+01	−9.189E+01

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.414693E + 01 PERCENT

其中，列出了 12 个谐波频率、幅值、相位和归一化值。可以看到和预期的一样，这里奇次谐波是最大的，总谐波失真为 44.14%。还可以看到，输出电压的直流分

量虽然只有几十个微伏，但并不为零。作为一个普遍的规律，逆变器输出的直流量必须尽可能接近于零。

6）电路的负载阻抗由一个 RLC 串联电路组成，输出一个经过滤波的负载电流波形。画出输出电流波形。

解 逆变器负载电流波形如图 6-35 所示，在初始过渡过程之后是一个接近于正弦波的波形。

7）计算电流波形的 rms 值。

解 这可以在 PSpice 显示模块内使用内部功能的“rms”命令直接获得，如图 6-36 所示。rsms 值在几个波形周期之后获得，I_o(rms) = 4.92A。

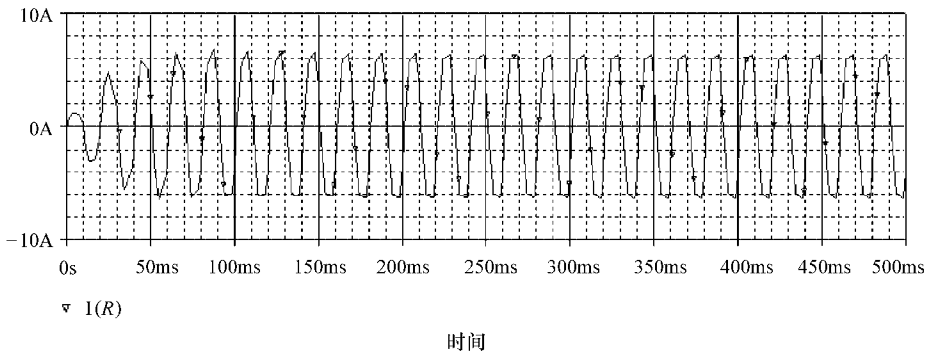


图 6-35 例 6.4 的逆变器输出电流波形

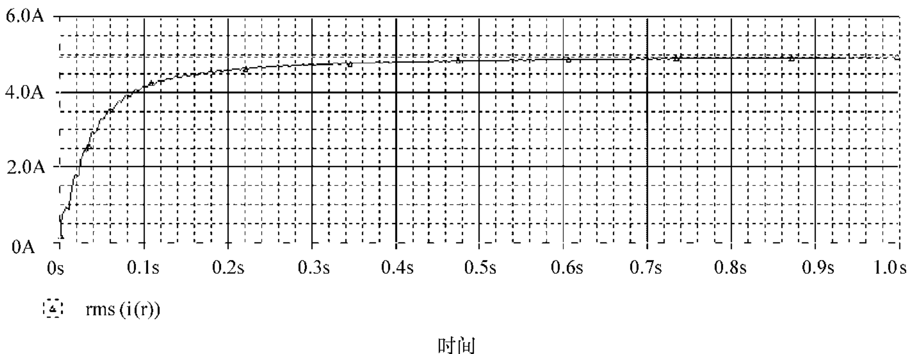


图 6-36 例 6.4 的逆变器输出电流的有效值

输出电压的有效值可以通过理论公式计算，假设方波电压幅值为 24V，有：

$$V_{0(\mathrm{rms})} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_0^2 \mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{2}{20\times 10^{-3}}\int_0^{10\times 10^{-3}} 24^2 \mathrm{d}t} = 24\mathrm{V}$$

和

$$I_{0(\mathrm{rms})}=\frac{V_0(\mathrm{rms})}{R}=\frac{24}{4}=6$$

仿真获得的结果与理论值不同，但具有相同的数量级，产生区别的原因在于实际波形有上升和下降沿时间。

8）对输出电流波形进行傅里叶分析。

解　因为 .FOUR 命令中包含了流过电阻的电流，傅里叶分析结果也可以直接从仿真输出文件中得到，如下所示：

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(R)
DC COMPONENT = -2.248941E-05

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	6.911E+00	1.000E+00	-2.547E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	7.918E-04	1.146E-04	-1.716E+02	-1.461E+02
3	1.500E+02	6.700E-01	9.695E-02	-6.633E+01	-4.087E+01
4	2.000E+02	9.830E-04	1.423E-04	-7.670E+01	-5.124E+01
5	2.500E+02	1.523E-01	2.203E-02	3.973E+01	6.519E+01
6	3.000E+02	6.035E-04	8.733E-05	3.394E+01	5.941E+01
7	3.500E+02	8.244E-02	1.193E-02	-1.083E+02	-8.280E+01
8	4.000E+02	3.718E-04	5.380E-05	2.701E+01	5.247E+01
9	4.500E+02	7.000E-02	1.013E-02	1.720E+02	1.975E+02
10	5.000E+02	5.207E-04	7.534E-05	1.402E+02	1.657E+02
11	5.500E+02	5.669E-02	8.203E-03	-5.334E+01	-2.787E+01
12	6.000E+02	1.389E-04	2.011E-05	1.529E+02	1.784E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.009803E+01 PERCENT

输出电流的总谐波失真为 10%。

9）画出逆变器效率。

解　逆变器瞬时效率可以使用 PSpice 仿真结果计算求得，如下式所示：

$$\eta=\frac{P_\mathrm{o}}{P_\mathrm{i}}=\frac{RI_\mathrm{o}^2}{V_\mathrm{i}I_\mathrm{i}}=\frac{4\mathrm{rms}[i(R)]^2}{\mathrm{AVG}\{V_{\mathrm{indc}}\mathrm{ABS}[I(V_{\mathrm{indc}})]\}}$$

逆变器效率也很容易如图 6-37 所示画出，一旦进入稳态，上述逆变器的效率为 90%。

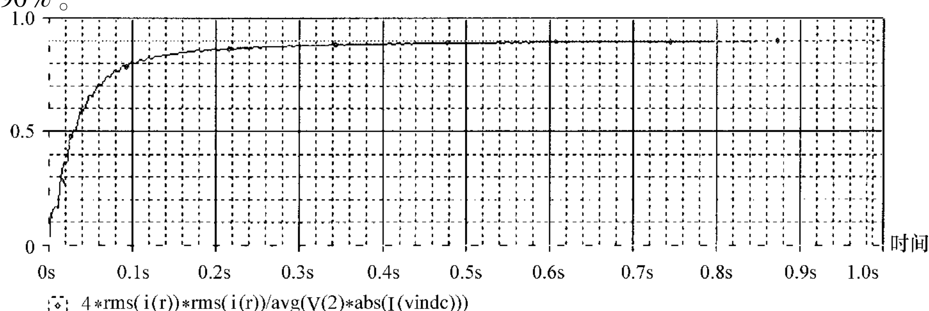


图 6-37　例 6.4 的逆变器效率

6.5.2 与 PV 发电装置直接连接的逆变器的 PSpice 行为模型

虽然只有在应用精确的功率开关器件模型时才能得到精确的结果，但上一节所述的基于拓扑结构的逆变器 PSpice 模型在设计逆变器内部结构时还是很有用的。

除了对功率电子器件进行精确建模比较困难之外，PV 系统工程师更关心的是逆变器的长期运行特性，而不是几个频率周期的特性。因此，使用与功率调节器中同样的方法，我们在这一节中对通用逆变器的行为模型进行描述。这使得我们可以探索逆变器和 PV 发电装置连接的某些性能。

逆变器行为模型的输入参数有：

1）逆变器效率 nf。模型中这个参数被认为是定值。如图 6-31 所示，多数逆变器的效率并非常数，但是通常在一定输出功率的范围内保持相对稳定。

2）最大输出功率 P_m。逆变器能够输送给负载的最大功率。

3）P_{load}。负载需要的功率。

逆变器模型被近似认为是一个电压源，其输出电压没有直流分量和谐波失真。该行为模型如图 6-38 所示。可以看到，逆变器输出为一个理想正弦电压源，输入电压被一个电压源 emod 进行配置，使得由 PV 发电装置的输出，或 DC－DC 变换器输出所形成的逆变器输入电压为：

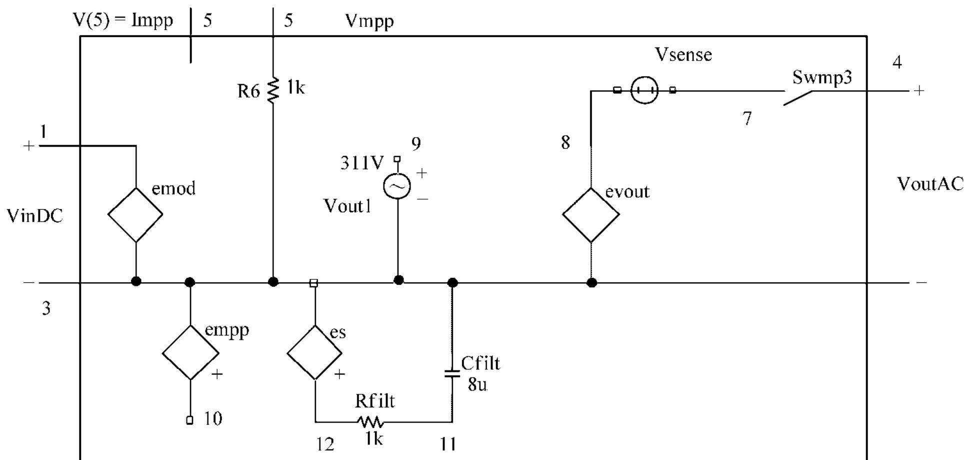


图 6-38　PSpice 文件 Inverter1.cir 的原理图

$$V_{iDC}=\frac{V_{oAC}I_{oAC}}{nf\ I_{iDC}} \tag{6-21}$$

其中：

$$nf=\frac{P_{AC}}{P_{DC}}=\frac{V_{oAC}I_{oAC}}{V_{iDC}I_{iDC}} \tag{6-22}$$

是逆变器效率，V_{oAC} 和 I_{oAC} 是输出电压和电流的有效（rms）值，V_{iDC} 和 I_{iDC} 是直流逆变器输入电压和电流。

在 PSpice 代码中写作：

```
emod 1 3 value = {(v(11) * 220/(nf * v(5))) - 0.8}
```
（6-23）

其中：

1）v（11）是经过滤波的逆变器输出电流的 rms 值。在下面完整的网络表中也可以看到，直流源 Vsense 连接在逆变器的输出端来获得逆变器输出电流信号。受控源 ec 取出流过 vsense 电流的绝对值，其后经由 Rfilt 和 Cfilt 组成的低通滤波器，将输出电流的有效值，转化为节点（11）的电压 v（11）。

2）逆变器输出电压有效值为 220V。

3）v（5）是 PV 发电装置最大功率点电流。

4）在式（6-23）中包括一个 0.8V 的修正因子，用来模拟阻断二极管的压降。

最后模型还有两个保护装置：

1）当负载需要的功率大于由模型参数 P_m 确定的逆变器最大输出功率时，逆变器输出电压被强制置零。

2）当逆变器输入功率乘以逆变器效率降到小于负载需要的功率 P_{load}时，开关 Swmp3 断开逆变器输出端负载。

逆变器模型的网络表如下：

```
*********** Inverter, behavioural model
*********** Inverter2.cir
.subckt inverter2 1 3 4 5 6 PARAMS: nf = 1, Pm = 1, Pload = 1
eVout 8 3 value = {IF (Pload < Pm, v(9), v(3))}
vsense 7 8 dc 0
Vout1 9 3 sin (0 311 50Hz)
r6 6 3 1000
empp 10 3 value = {v(5)*v(6)*nf/(Pload)}
SWmp3 4 7 10 3 sw3mod
.model sw3mod vswitch (Roff = 1e+9, Ron = 0.0001, voff = 0.991, von = 1.01}
ecorriente 12 3 value = {abs(i(vsense))}
Rfiltro 11 12 10000
Cfiltro 11 3 0.000008
emod 1 3 value = {(v(11)*220/(nf*v(5))) - 0.8}
.ends inverter2
```

上述网络表的等效电路如图 6-39 所示，子电路模型的输入输出节点都已标出。

为了说明逆变器模型的特性，对图 6-40 所示例 6.5 的系统进行 PSpice 仿真。系统由一个 PV 发电装置，与其通过阻断二极管相连的逆变器以及负载组成。PV 发电装置利用第 4 章的

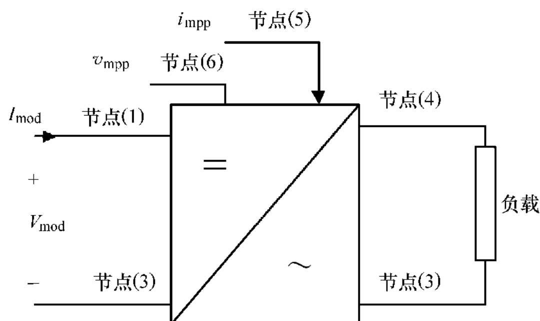


图 6-39　逆变器连接图

"generator_ beh. lib" 建模。

例 6.5 假设一个如图 6-40 所示的系统，其 PV 发电装置由 6 个模块串联组成。每个模块由 36 个太阳电池串联组成，在标准状态下短路电流 $i_{scmr}=5.2\text{A}$，开路电压 $v_{ocmr}=21.2\text{V}$。模块最大功率点坐标为：$i_{mpp}=4.7\text{A}$，$v_{mpp}=17.3\text{V}$，最大功率 $p_{maxr}=510\text{W}$。逆变器参数为：效率 $nf=0.9$，逆变器输出最大功率 $P_m=420\text{W}$，负载预期功率（额定负载）$P_{load}=107.5\text{W}$。最后，一个 450Ω 的电阻连接到逆变器输出：

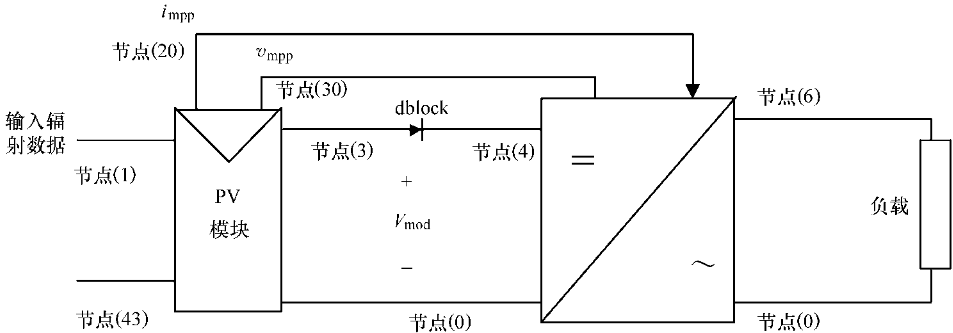


图 6-40　逆变器模型仿真原理框图

1）在辐射条件如文件 irrad3. stl 所示，环境温度恒定为 25℃时，写出 PSpice 网络表。

解

```
******* Inverter simulation
******* Example 6.5.cir
.inc generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=1, pmaxmr=85,
+noct=47, immr=4.9, vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=6, npg=1
.inc irradprueba2.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
vtemp 43 0 dc 25
dblock3 4 diode
.model diode d(n=1)
.inc inverter2.cir
xinvert 4 0 6 20 30 inverter2 params: nf=0.9, Pm=600, Pload=107.5
Rload 6 0 450
.options stepgmin
.tran 0.1ps 2.80s
.probe
.end
```

文件 irrad2. stl 包含的辐射数据如图 6-41 所示，其中内部时间单位为 s。这是一组非常不切实际的辐射数据，变换非常快，以便于在不消耗很长仿真时间的条件

下研究 PV 系统特性。可以看到时间结束在 2. 64s。

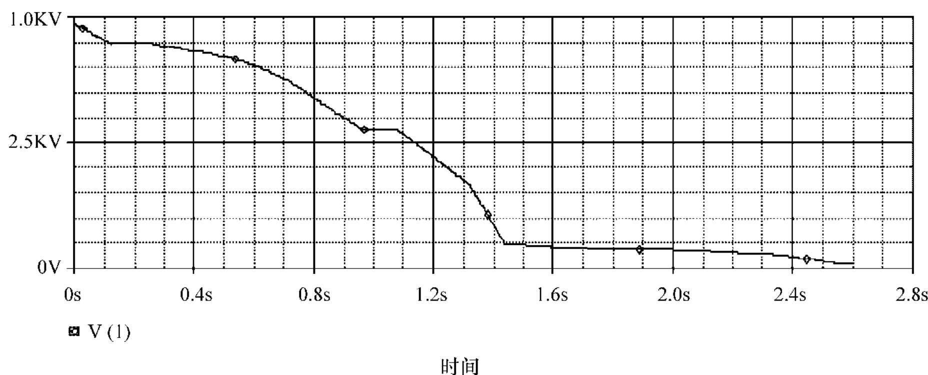


图 6-41 文件 irrad2. stl 的辐射数据

2）运行仿真，画出最初几个周期的逆变器输出电压波形。

解 图 6-42 显示了逆变器输出电压在 600ms 和 900ms 之间的结果。可以看到，输出为期望频率的正弦波。

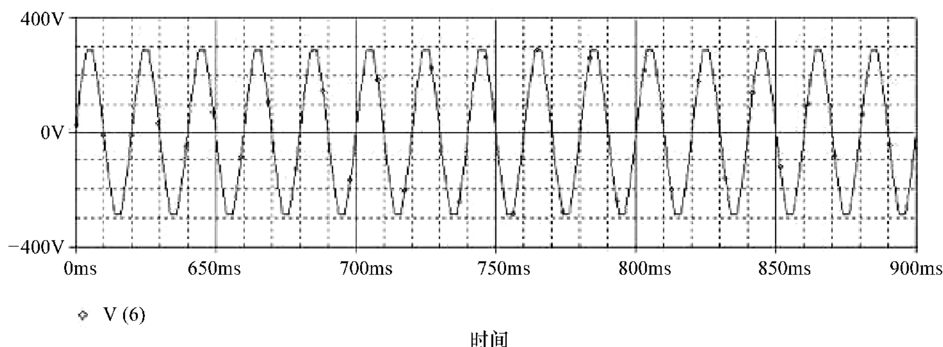


图 6-42 逆变器输出电压

3）画出当输入功率小于负载需求时，负载断开的响应。

解 在 1. 43s 附近观察输出电流的情况可以看到，当逆变器输入功率因为辐射的原因降低到低于负载需要的功率 107. 5W 时，开关 Swmp3 将负载从逆变器输出端断开。此现象可以从图 6-43 和图 6-44 观察到。

比较图 6-43 和图 6-44 的仿真结果，可以清楚地看到负载断开的效果。当逆变器输入功率由于辐射的原因降低，变得小于逆变器输出负载需要的功率时，断开负载且逆变器输出电压降为零。

4）给出逆变器输入电压和输入电流的时域波形。

解 图 6-45 显示了逆变器输入电压波形，因为辐射的原因迫使 PV 输出电流降低，

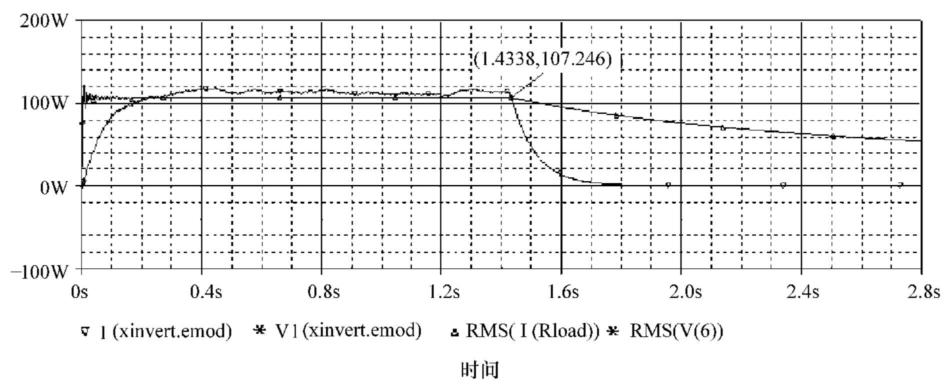


图 6-43　逆变器输入功率（下）I（xinvert. emod）*　V1（xinvert. emod）和负载需要的功率（上）RMS（I（Rload）*RMS（V（6））

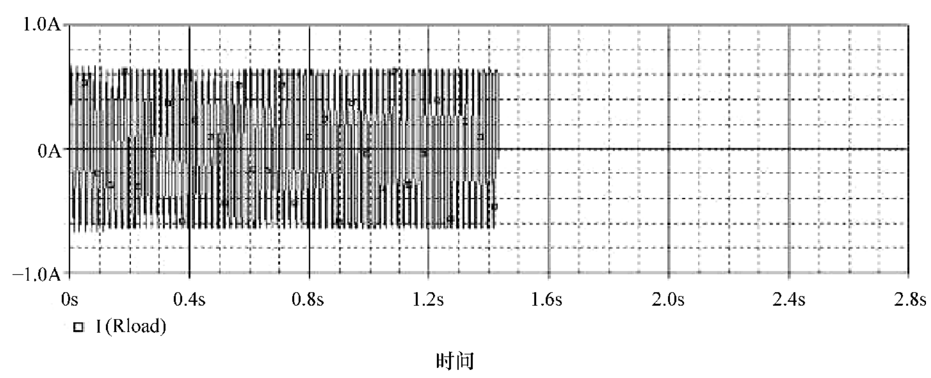


图 6-44　逆变器输出电流波形

如图 6-46 所示，造成了输入电压在观察区间起始处开始上升。这个现象是图 6-30 所示的逆变器特性的结果。逆变器输入总功率保持不变，等于输出功率除以效率。

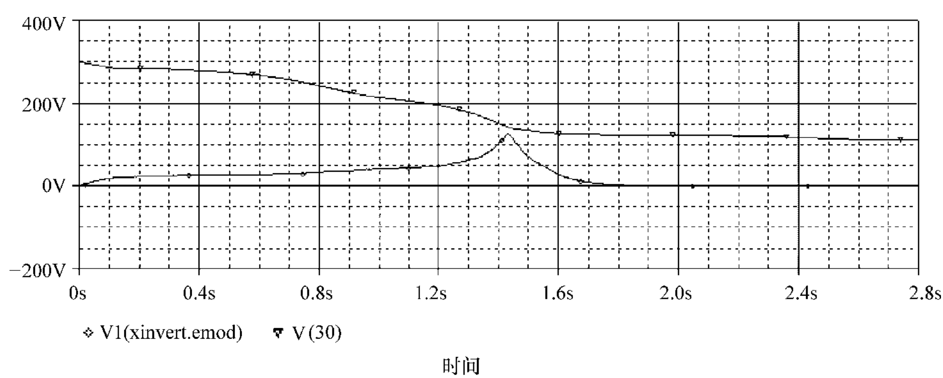


图 6-45　逆变器输入电压 V1（xinvert. emod）（下）和 PV 模块最大功率点电压 V（30）（上）

负载断开的效果还可以在逆变器输入功率不能满足负载需要时看到，此时由于逆变器将负载切除以及逆变器输入电压迅速降低，使得 PV 模块处于开路状态。

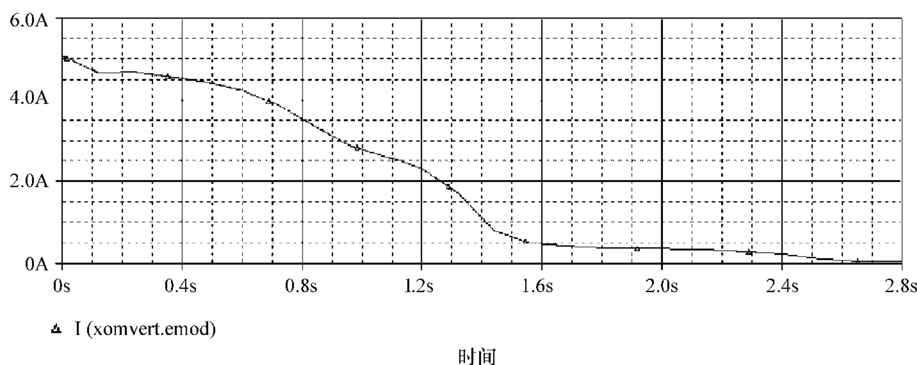


图 6-46　逆变器输入电流波形

6.5.3　和电池相连的逆变器的 PSpice 行为模型

在有些应用场合，逆变器并不是直接与 PV 模块相连，而是通过充电调节设备进行连接，或连接到电池的。此时电池和逆变器间需要接口，从而要求对基于上一节所述模型的逆变器的行为模型进行修改，包括：

1）逆变器输入功率控制是基于电池的荷电 SOC 额定状态进行的。如果 SOC 下降 30%，开关管 Swemp3 将负载从逆变器输出端断开。电池的 SOC 值在逆变器节点（5）和节点（6）处监测。

2）逆变器输入：在逆变器输入端安置了一个电流源以取代了前一节模型中的电压源实现偏置。例 6.6 网络表中新的 g－源 gindc 决定了逆变器输入的电流，该电流与负载需要的功率、逆变器效率，逆变器输入电压的函数关系如下：

$$I_{\mathrm{iDC}} = \frac{V_{\mathrm{oAC}} I_{\mathrm{oAC}}}{nf V_{\mathrm{iDC}}} \tag{6-24}$$

在 PSpice 代码中由以下语句实现：

```
gindc 1 3 value = {(v(11) * 220/(nf * v(1)))}
```
（6-25）

其中，v（11）是逆变器输出电流的有效值，v（1）是逆变器直流输入电压，nf 是逆变器效率，并且逆变器输出电压有效值默认为 220V。

例 6.6 和例 6.7 介绍了新模型的工作。

例 6.6　写出新行为模型的子电路模型。

解　下面的网络表中，新的语句被用黑体标注。

```
********** Inverter2 model 1.0
** example 6.6.cir
.subckt inverter2 1 3 4 5 6 PARAMS: nf=1, Pm=1, Pload=1
eVout 8 3 value={IF (Pload<Pm, v(9), v(3))}
vsense 7 8 dc 0
Vout1 9 3 sin (0 300 50Hz)
r6 6 3 1000
empp 10 3 value={v(5)/(0.3)}
SWmp3 4 7 10 3 sw3mod
.model sw3mod vswitch (Roff=1e+9, Ron=0.001, voff=0.981, von=1.1}
ec 12 3 value={abs(i(vsense))}
Rfil 11 12 10000
Cfilt 11 3 0.000008
gindc 1 3 value={(v(11)*220/(nf*v(1)))}
.ends inverter2
```

例 6.7 对图 6-47 框图所示的 PV 系统进行仿真。

PV 系统组成如下：

PV 发电装置：216 块太阳电池串联组成 PV 发电装置，特性为：短路电流 $i_{scmr}=5A$，开路电压 $v_{ocmr}=130V$；最大输出功率 $p_{maxr}=480W$，标准情况下最大功率点坐标为 $i_{mppr}=4.7A$，$v_{mppr}=102V$。本例中使用的 PV 发电装置模型不同于先前使用的旨在加快仿真速度简化模型。这是因为整个系统中含有的多个非线性元件（PV 发电装置本身、电池、二极管、DC－DC 和 DC－AC 变换器）而需要的。

用下述网络表来描述这个 PV 发电装置：

```
*************pv generator
************ moduleppt.cir
.subckt moduleppt 10 12 13 14 15 17  params: iscmr=1, ta=1, tempr=1,
+vocmr=1, ns=1, np=1, nd=1,
+pmaxr=1, imppr=1, vmppr=1
girrad 10 11 value={(iscmr/1000*v(12))}
d1 11 10 diode
.model diode d(is={iscmr/(np*exp(vocmr/(N*uvet)))}, n={N})
.func N() {ns*nd}
Rirrad 12 10 100000
Rtemp 13 10 1000000
vtemp 13 10 dc {tempr}
rsm 11 14 {RSM}
.func RSM() {vocmr/iscmr-pmaxr/(ffom*iscmr^2)}
.func ffom() {(vocmnorm-log(vocmnorm+0.72))/(1+vocmnorm)
.func uvet() {8.66e-5*(tempr+273)}
.func vocmnorm() {vocmr/(nd*ns*uvet)}
**** MPP calculation
gimout 10 15 value={iscmr*(v(12)/1000)}
evdc 16 10 value={0.004*(v(13)-tempr)+(0.12e-3*v(12))+0.06*log
+(1000/v(12))*vocmr}
evmppout 17 10 value={vmppr-v(16)}
.ends moduleppt
```

系统的其他元件特性为：

1）DC－DC 变换器：效率100%，输出电压28V。

2）电池：电池电压＝24V，电池容量 $C=471\text{Ah}$，充放电效率0.91，自放电率 $D=1\times10^{-9}\text{h}^{-1}$，初始荷电状态 $\text{SOC}_1=0.65\%$。

3）逆变器：效率为 $nf=0.9$，最大交流输出功率 $P_m=500$。

4）负载：负载需要的总功率 $P_{load}=350\text{W}$，$R_{load}=138\Omega$。

5）两个阻断二极管：d2 和 d3。

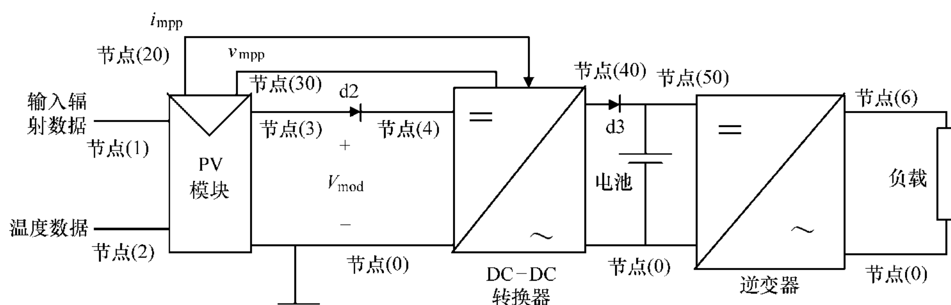


图 6-47　例 6.6 的原理框图

采用如图 6-48 所示辐射曲线，对应巴塞罗那四月份里 4 天的辐射，见文件 spril. stl。注意，时间单位为 ms，文件中辐射曲线所采用的时间比例系数为 10^{-6}，以提高仿真速度。

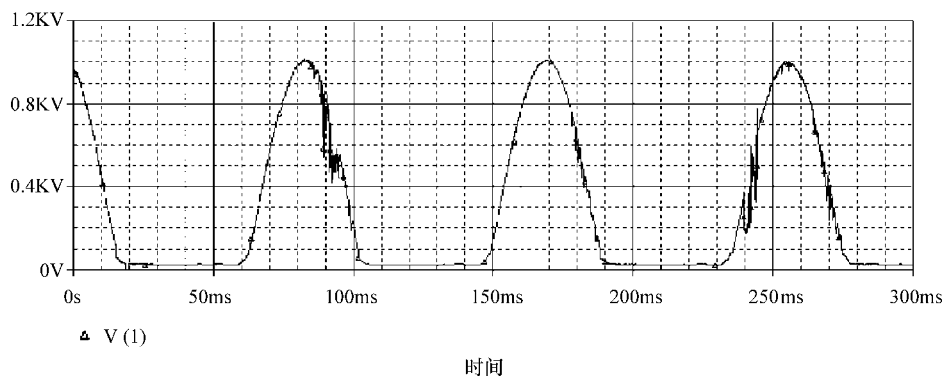


图 6-48　辐射数据

1）假设上述 PV 模块模型如网络表 moduleppm. cir 所示，写出仿真图 6-47 所示 PV 系统的网络表。

解　仿真上述 PV 系统的 PSpice 等效电路的网络表为：

```
******* Example 6.7.cir
.inc moduleppt.cir
xmodule 0 1 2 3 20 30 moduleppt params: iscmr=5, tempr=25, vocmr=130,
—ns=216, np=1, nd=1, pmaxr=480, imppr=4.7, vmppr=102, ta=25
.inc april.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
r111 20 0 1
d2 3 4 diode
.model diode d(n_1)
.inc dcdcf.cir
xconv 0 4 20 30 40 dcdcf params: n=1, vo1=28
d3 40 50 diode
.inc batstdif.cir
xbat 50 0 100 batstdif PARAMS: ns-12, SOCm-11304, k-0.91, D-1e-9, SOC1-0.65
.inc inverter2.cir
xinvert 50 0 6 100 100 inverter2 params: nf-0.9, Pm-500, Pload-350
rload 6 0 138
.options abstol_0.1mA Vntol_0.001
.tran 0.1s 0.3s
.probe
.end
```

2）获得电池荷电状态 SOC 的变化。

解 图 6-49 显示了电池荷电状态 SOC 的变化，从 SOC =0. 65% 开始，最终达到 SOC =0. 16% 。

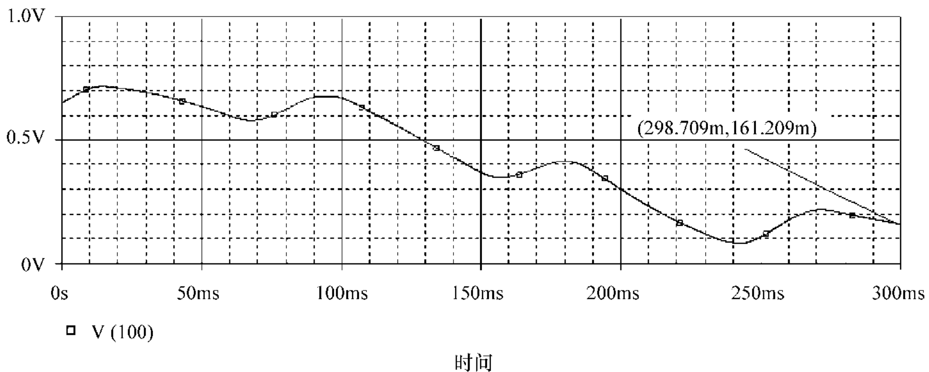


图 6-49 例 6. 6 的 SOC 变化

3）找到逆变器断开负载。

解 图 6-50 显示了逆变器输出电压。可以看到，当电池 SOC 低于 30% 时，逆变器输出端与负载的连接断开。逆变器输出电压频率为 50Hz，如上所述，图示的仿真总时间为 0. 3s，对应实际时间为 83. 3h。逆变器输出的频率没有像时间单位那样为加快仿真速度进行比例变换。断开现象发生在内部 PSpice 时间为 199. 57ms，对应真实系统运行时间为 55. 43h，很明显图 6-50 所示的输出电压的周期数与该信号的实际特性不符。

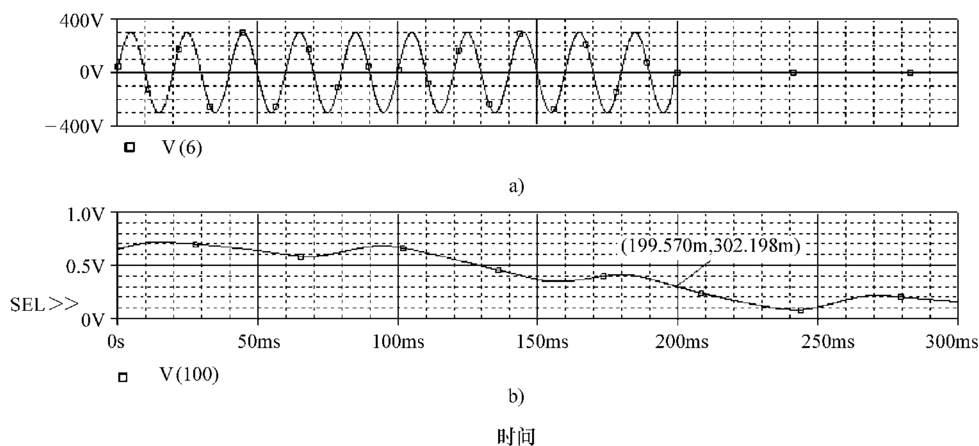


图　6-50

a）逆变器输出电压 V(6)　b）SOC 状态 V（100）

4）画出电池电流波形和 PV 发电装置提供的电流波形。

解　图 6-51 显示了这些波形，I（xbat. vcurrent）为电池充电电流，I（xmodule. rsm）为 PV 发电装置输出电流。

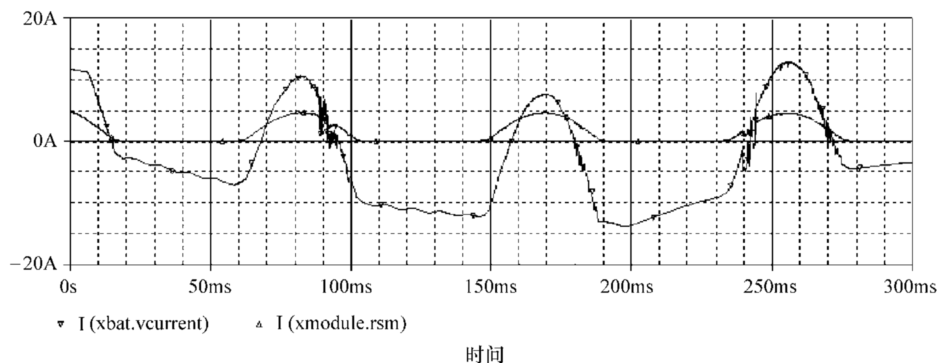


图 6-51　电池电流 I（xbat. vcurrent）和 PV 模块输出电流 I（xmodule. rsm）波形

6.6　习题

6.1　假设一个 PV 系统的原理框图如图 6-47 所示。所包含的元件特性为：

铅蓄电池：1）起始荷电状态：$SOC_1 = 078$；

2）最大荷电量：$SOC_m = 6720Wh$；

3）2V 电池串联数：$ns = 6$；

4）$K = 0.75$，电池充放电效率；

5）$D=1\times10^{-4}h^{-1}$，电池自放电率。

PV 模块：由 33×2 太阳电池组成，$ns=33$，$np=2$。

1）短路电流 $i_{scmr}=6.54A$；

2）开路电压 $v_{ocmr}=19.8V$；

3）最大输出功率 $p_{maxr}=94W$；

4）Vmaximum power point =16V；

5）Imaximum power point =5.88A。

DC－DC 变换器效率 =0.8，$V_{o1}=14V$。

逆变器效率 =0.9，$P_{max}=500W$。

负载：180Ω DC 负载，与电池固定连接。

假设以例6.7 中图6-48 所示的辐射数据作为PV 系统特性仿真的输入数据，完成 PV 系统特性仿真并得到仿真结束时电池的荷电状态。

6.2　假设一个 PV 系统组成如下：

1）一个 PV 发电装置：216 块太阳电池串联组成 PV 发电装置，特性为：短路电流 $i_{scmr}=5A$，开路电压 $v_{ocmr}=130V$；最大输出功率 $p_{maxr}=480W$，标准情况下最大功率点坐标为 $i_{mppr}=4.7A$，$v_{mppr}=102V$。

系统的其他元件特性为：

2）电池电压 =24V；电池容量 $C=471Ah$；充放电效率为 0.91；自放电率 $D=3\times10^{-9}h^{-1}$；初始荷电状态 $SOC_1=0.8\%$。

3）逆变器：效率为 $nf=0.9$，最大交流输出功率 $P_m=500$。

4）负载：负载需要的总功率 $P_{load}=37W$，$R_{load}=1300\Omega$。

5）两个阻断二极管：d1 在 PV 模块和电池之间，d2 在电池和逆变器之间。

假设图6-48 所示的辐射数据为巴塞罗那四月份里 4 天的辐射，存于文件“april. stl”中。注意，时间单位为 ms，本文件中辐射数据的时间比例系数为 10^{-6}，以提高仿真速度。

使用本章中使用于网络表的 PV 发电装置模型 moduleppm. cir，逆变器模型 inverter3. cir 和电池模型 batstdif. cir，获得：

（1）使用 PSpice 仿真该 PV 系统的网络表；

（2）电池 SOC 终值；

（3）仿真结束时的电池电压。

参 考 文 献

[6.1] Woodworth, J.R., Thomas, M.G., Stevens, J.W., Harrington, S.R., Dunlop, J.P., and Swamy, M.R., ‘Evaluation of the batteries and charge controllers in small stand-alone photovoltaic systems’, *IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, **1**, pp. 933–45. Hawaii, December 1994.

[6.2] Wong Siu-Chung, and Lee Yim-Shu, 'PSpice modeling and simulation of hysteric current-controlled Cúk converter', *IEEE Transactions on Power Electronics*, **8**(4), October 1993.

[6.3] Lee, Y.-S., Cheng, D.K.W., and Wong, S.C., 'A new approach to the modeling of converters for PSPICE simulation', *IEEE Transactions on Power Electronics*, **7**(4), 741–53, October 1992.

[6.4] Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P., *Power Electronics*, Wiley, 1995.

[6.5] Hui, S.Y., Shrivastava, Yash, Shatiakumar, S., Tse, K.K., and Chung, Henry, Shu-Hung, 'A comparison of non deterministic and deterministic switching methods for dc-dc power converters', *IEEE Transactions on Power Electronics*, **13**(6), 1046–55, November 1998.

[6.6] Rashid, Muhammad, H., *PSpice Simulations of Power Electronics, selected Readings*', IEEE, 1996.

[6.7] Rashid, Muhammad, H., '*Power Electronics Laboratory using PSpice*, IEEE, 1996.

第 7 章　独立 PV 系统

摘要：本章通过介绍独立 PV 系统和其 PSpice 模型，对能量平衡、能量失配、负载不足概率和短期、长期仿真波形等概念加以说明，并与监测波形进行比较。结合使用模拟太阳辐射时间序列的长期仿真，说明独立 PV 系统的分析方法和简化估算程序。

7.1　独立 PV 系统

尽管最近市场上更多地关注并网系统，但独立 PV 系统仍是最普遍且最广泛使用的系统。一个独立 PV 系统应该能为非联网（线路完全独立）的应用场合提供充足的能量。独立 PV 系统标准配置如图 7-1 所示，可以看到 PV 发电装置与储能蓄电池（此连接可以包括保护和功率调节设备）和负载连接。在一些特殊场合，例如水泵系统，发电装置可以直接与电动机连接。

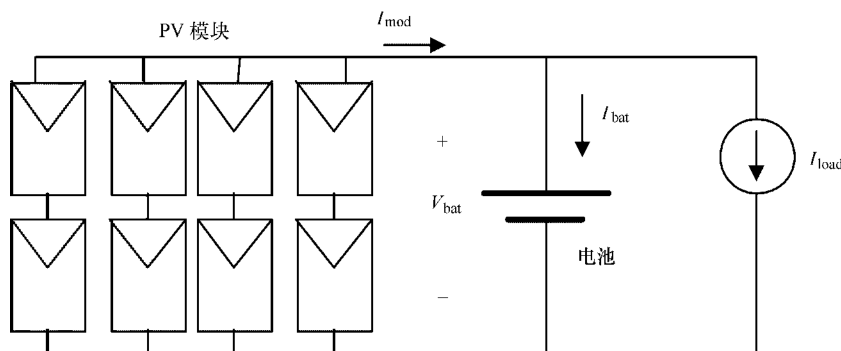


图 7-1　独立 PV 系统

第 6 章已经描述了 PV 应用中可能遇到的各种模型，例如 PV 模块、功率调节设备、逆变器、蓄电池和特殊工作装置。本章中通过介绍一个给定应用条件的 PV 系统的简化估算程序，举例说明以下 6 个重要概念：

1）标准日等效长度或峰值日照时数（PSH）概念；

2）发电和负载的能量失配；

3）PV 系统的能量平衡；

4）负载不足概率（LLP）；

5）系统级仿真及与监测数据比较；

6）使用随机产生的辐射和温度序列的长期仿真。

7.2　等效峰值日照时数的概念

引入等效峰值日照时数（PSH）的概念是十分有用的。PSH 的定义为：辐射度为 1000W/m^2，T_{cell} = 25℃时的等效每日日照时间。在这种方式下，一个太阳等效日照时间与实际一天内的太阳辐射（一天内辐射度的时间积分）是相等的。

假定给定一天内实际辐射度曲线为 $G(t)$，等效日辐射度定义为：1kW/m^{2}的辐射在 PSH 时间内的辐射量。令实际一天内所有日照辐射量与太阳等效日内的辐射量总值相同，那么有

$$\int_{day} G(t)\,dt = 1 \cdot \mathrm{PSH} \tag{7-1}$$

可以看到，如果辐射度的单位为 kW/m^2，那么每日太阳辐射的数值与参数 PSH 的数值相等。

下面通过举例进一步说明 PSH 的定义。

例 7.1　确定巴塞罗那（北纬 41.318°，西班牙）1 月 16 日的平均辐射度数据。

1）写出 PSpice. cir 文件，计算这一天所接受的辐射量的总和。

首先编写一个包含这一天内每小时辐射度数据的子电路[7.1]，建立下面文件“irrad _ jan _ 16”中的一个 PWL（分段线性化）源“virradiance”：

```
*irrad_jan_16.lib
.subckt irrad_jan_16 12 10
virradiance 12 10 pwl 0u 0,1u 0,2u 0,3u   0,4u 0,5u 0,6u 0,7u 0
+8u 0,9u 76,10u 191,11u 317,12u 418,13u 469,14u 469,15u 418,16u 317
+17u 191,18u 76,19u 0,20u 0,21u 0,22u 0,23u 0,24u 0
.ends irrad_jan_16
```

这些照度值将会在子电路节点（12）处得到。

编写如下一个 . cir 文件来计算时间积分：

```
*irrad_jan_16.cir
xrad 72 0 irrad_jan_16
.include irrad_jan_16.lib
erad 70 0 value={sdt(v(72)*1e6)}
vpsh 73 0 pulse (0 1000 11u 0 0 2.941u 24u)
epsh 74 0 value={sdt(v(63)*1e6)}
.tran 0.001u 24u
.probe
.end
```

节点（70）将返回每日辐射量的值。

结果如图 7-2 所示。可以看到，时间积分给出的每日辐射量总和为 2. 94kW/m^2，根据式（7-1），这意味着参数 PSH 的值是 2. 94h。

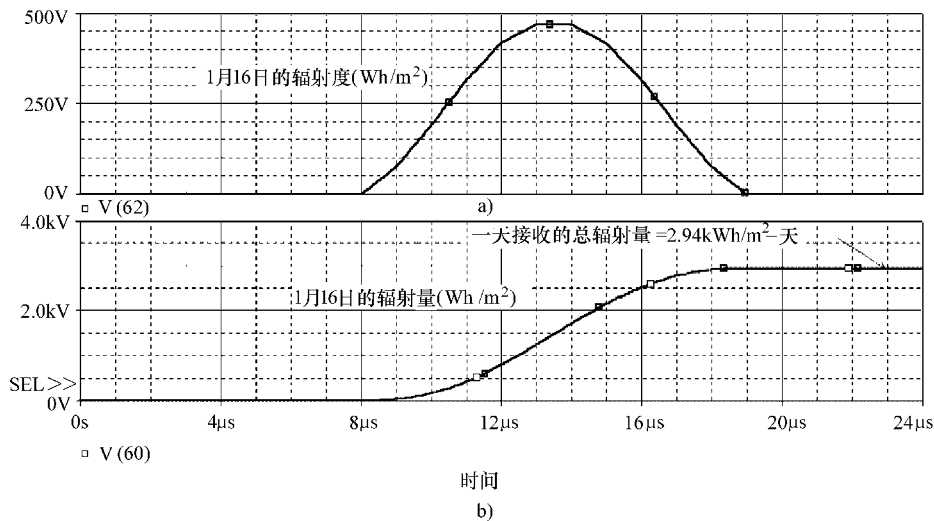


图 7-2　a）1 月 16 日倾斜度为 40°时的巴塞罗那地区的辐射度曲线；b）辐射度的时间积分

注：a）y 轴为辐射度，单位为 W/m²；b）y 轴是辐射量，单位为 kWh/m²。

这两个图中，x 轴 PSpice 时间单位是 μs，对应真实单位小时（1μs = 1h）。

2）绘出辐射量和等效日的辐射度分布曲线。根据定义，选择一个照度为 1kW/m²时，长度为 2.94h 的等效日（根据定义，等效日与辐射度脉冲的初始和终止时间无关，因此选择 11:00 作为等效日的初始时间，13:94 作为终止时间），如图 7-3 所示。

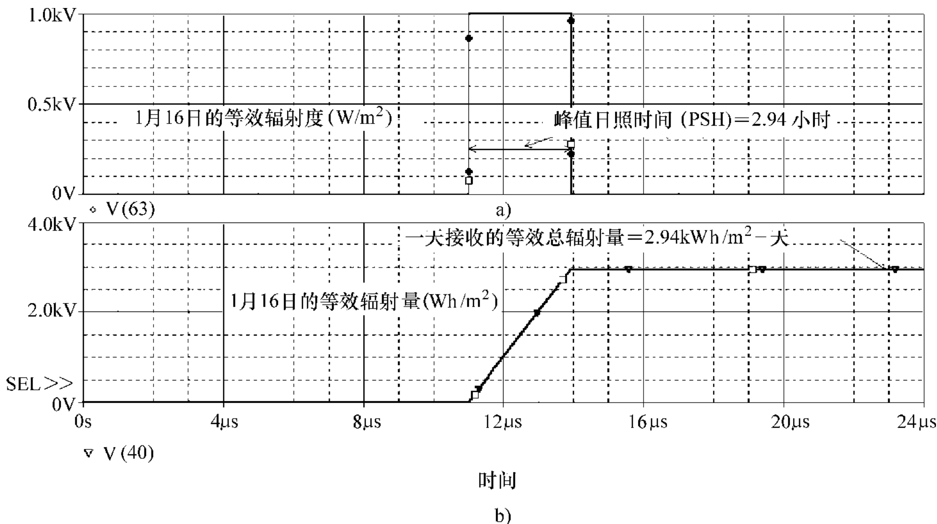


图 7-3　a）1 月 16 日倾斜度为 40°时巴塞罗那地区的等效太阳辐射度曲线；b）等效太阳辐射的时间积分

注：a）y 轴是辐射度，单位为 W/m²；y 轴是辐射量，单位为 kWh/m²。

这两个图中，x 轴 PSpice 时间单位是 μs，对应真实单位小时（1μs = 1h）。

源 vpsh 是模拟等效太阳日的脉冲电压源。其时间积分在节点（74）得到。

因为 PV 商用模块的技术信息通常只包括标准性能，所以电力系统提出了 PSH 的概念。尽管工作条件可以转化为第 4 章中讲述的任意辐射和温度条件，但如果使用太阳等效日概念，则 PSH 的定义允许使用标准性能进行分析，从而建立给定的 PV 系统的一阶简化能量潜力模型。

当然，由于没有考虑温度的影响，估算 PV 发电装置发出的电能时，这种近似有一定的误差。例 7.2 用来对 PSH 概念的精度进行评估。在下面的例子和小节中将具体描述如图 7-4 所示的 PV 系统的评估，该框图包括一个由辐射度和温度曲线所驱动的 PV 模块，该模块与理想蓄电池 V_{bat} 和与一个开关串联的电阻负载相连接。图中开关能够对负载连接方案进行方便的修改，便于对三种负载情况进行分析。

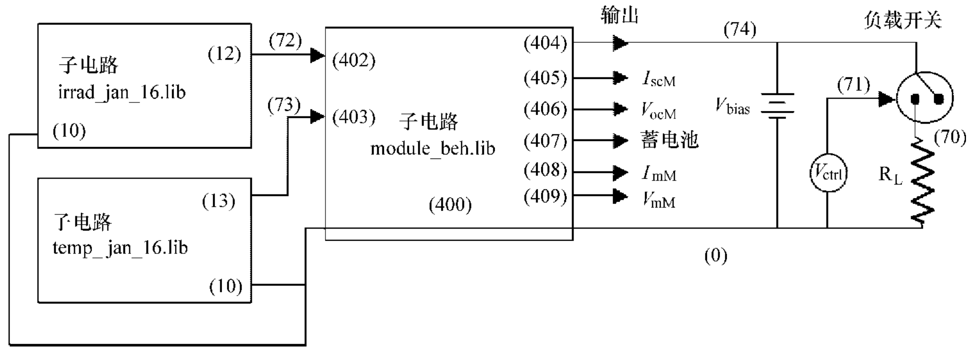


图 7-4　用来说明功率失配负载、夜间负载和日间负载的电路框图

例 7.2　一个如图 7-4 所示的简单装置，开关处于打开状态，电池电压设置为零。在这个例子中将使用输出为最大功率点的两个坐标。

假设辐射度如例 7.1 中 1 月 16 日所示，温度曲线按照附录 G 中文件“temp _ jan _ 16. lib”所示。计算这个 PV 模块在最大功率点所产生的能量总和。

解　必须通过运行下面的 PSpice 文件“psh. cir”，对该 PV 模块一整天的最大功率点进行时间积分，来计算得到所产生的能量总和：

```
*psh.cir

.include irrad_jan_16.lib
.include temp_jan_16.lib
.include module_beh.lib
xtemp 73 0 temp_jan_16
xirrad 72 0 irrad_jan_16
xmodule 0 72 73 74 75 76 77 78 79 module_beh params: iscmr=5,coef_iscm=9.94e-6,
+vocmr=22.3, coef_vocm=-0.0828, pmaxmr=85,noct=47,immr=4.726, vmmr=17.89,
+tr=25, ns=36, np=1

vaux 74 0 dc 0
.tran 0.01u 24u
.probe
.end
```

v(78) 和 v(79) 分别为在最大功率点时的电流和电压值，运行“psh. cir”后，由

$$\int_{day} P_{max}(t)\,dt = \int_{day} I_{mM}(t)V_{mM}(t)\,dt = 263\text{Wh/d} \tag{7-2}$$

得到当天所产生的能量。

在一天 PSH 长度内由同样模块所产生的等效日能量的总和（注：标准特性下，一个太阳时提供的能量是 85W）为

$$85\text{W} \times \text{PSH} = 85\text{W} \times 2.94\text{h} = 249.9\text{Wh/d} \tag{7-3}$$

这里 PSH = 2.94，是巴塞罗那在 1 月 16 日，倾斜度为 40°时所接收的辐射总量，单位为 kWh/m^2，为例 7.1 中计算得到的值。

比较例 7.2 中式（7-2）和式（7-3）得到的结果，很清楚地看到使用 PSH 概念估算的由 PV 模块在 1 月某一天所产生的能量总和大约偏低 5%。这是因为 1 月巴塞罗那的平均环境温度接近 10℃，并且光照强度也很弱，所以电池工作温度要比参考标准温度低，导致 PV 模块发出更大的功率。习题 7.1 处理同样的问题，而 6 月的光照强度和温度都高于参考标准，这会得到不同的结论。

7.3 PV 系统中的能量平衡：简化估算 PV 阵列容量的过程

由于特定地方太阳辐射的随机性、地平线的影响、周围环境的反射、收聚面的方向（包括方位和倾角）和用户所需要能量的数据不稳定，确定独立 PV 系统的容量是一项困难的任务。

所有确定独立 PV 系统容量的方法和这里所描述的方法一样有一定的误差，但本章讲述的是一个简单的方法，即考虑 PV 系统的能量平衡和 PSH 概念。这个方法清楚地描述了不同参数产生的影响。与更严格的方法[7.3]的结果作比较可知，参考文献［7.2］的方法有实际意义。

在 PV 系统中，能量平衡由一个等式来确定，即在给定时间内消耗的能量等于 PV 系统在该段时间内产生的能量。实际上，这个通用等式必须按给定应用的最适宜的时间段来建立。例如，如果该应用是夏天水泵系统，则会对夏天的能量平衡感兴趣；反之，如果该应用为全年独立发电系统，则仅会考虑全年时间的能量平衡。任何情况下，对分析的那一段时间来说，最保守的准则通常会按照太阳辐射比较弱的月设计（按最坏情况设计），而相对不保守的方法是按照此时间段内每月辐射的平均值设计（平均设计）。

在确定的一天，使用 PSH 概念和能量平衡法可以写出如下的能量平衡等式：

$$P_{maxGr}\text{PSH} = L \tag{7-4}$$

式中，P_{maxGr}是 PV 发电装置在标准条件（1000W/m^2，AM1.5 和工作温度 25℃）下的额定输出功率，PSH 是峰值日照时数（数值等于每天总辐射量按照 kWh/m^2 单

位计算)，L 是这一个平均日照（或者最坏日照）天内负载所消耗的能量。

对于两种设计情况，式（7-4）可以写为：

（1）最坏情况设计

$$P_{\mathrm{maxGr}}(\mathrm{PSH})_{\min} = L \tag{7-5}$$

式中，$(\mathrm{PSH})_{\min}$是最坏月份时的 PSH 值。

(2)平均设计

$$P_{\mathrm{maxGr}}(\overline{\mathrm{PSH}}) = L \tag{7-6}$$

式中，$(\overline{\mathrm{PSH}})$是 12 个月 PSH 的平均值。

继续使用平均值设计。用其数值替代其额定最大功率：

$$V_{\mathrm{mGr}} I_{\mathrm{mGr}}(\overline{\mathrm{PSH}}) = L \tag{7-7}$$

因为 PV 发电装置由 N_{sG}组串联、N_{pG}组并联组成，则有

$$N_{\mathrm{sG}} V_{\mathrm{mMr}} N_{\mathrm{pG}} I_{\mathrm{mMr}}(\overline{\mathrm{PSH}}) = L \tag{7-8}$$

式中，V_{mMr}和 I_{mMr}是在 $1000\mathrm{W/m^2}$ AM1.5 条件下，一个 PV 模块在最大功率点时的电压和电流值。

由式(7-8)可得

$$N_{\mathrm{sG}} N_{\mathrm{pG}} = \frac{L}{V_{\mathrm{mMr}} I_{\mathrm{mMr}}(\overline{\mathrm{PSH}})} \tag{7-9}$$

通常，独立 PV 系统的负载与 DC 电压源 V_{cc}相连。因此，负载 L 可以写为

$$L = 24 V_{\mathrm{cc}} I_{\mathrm{eq}} \tag{7-10}$$

式中，I_{eq}是一天之内流过负载的等效直流电流。代入式(7-9)得

$$N_{\mathrm{sG}} V_{\mathrm{mMr}} N_{\mathrm{pG}} I_{\mathrm{mMr}}(\overline{\mathrm{PSH}}) = 24 V_{\mathrm{cc}} I_{\mathrm{eq}} \tag{7-11}$$

PV 系统产生的有效能量与式(7-11)左侧所给的值不相同的原因有很多。其中一个原因是前面提到的峰值太阳时的概念过低或过高估计了产生的能量。其他原因与在 PV 发电装置和负载之间的几个接口的能量传输效率有关，例如，MPP 跟踪器的效率，蓄电池本身充放电的效率，线路损耗和向交流负载供能的 DC－AC 变换器的效率。这意味着设计过程中必须有意地偏大设计以抵消这些能量损耗。这种情况下引入工程裕度系数或者安全系数(SF)是非常有效的，此时，式(7-11)改写为

$$N_{\mathrm{sG}} V_{\mathrm{mMr}} N_{\mathrm{pG}} I_{\mathrm{mMr}}(\overline{\mathrm{PSH}}) = (\mathrm{SF}) 24 V_{\mathrm{cc}} I_{\mathrm{eq}} \tag{7-12}$$

最后式(7-12)分为两部分：

$$N_{\mathrm{sG}} = (\mathrm{VSF}) \frac{V_{\mathrm{cc}}}{V_{\mathrm{mMr}}} \tag{7-13}$$

$$N_{\mathrm{pG}} = (\mathrm{CSF}) \frac{24 I_{\mathrm{eq}}}{I_{\mathrm{mMr}}(\overline{\mathrm{PSH}})} \tag{7-14}$$

这个独立方程组能够确定 PV 模块的串联数[见式(7-13)]和并联数[见式(7-14)]。并且工程安全系数(SF)也被分成电压安全系数(VSF)和电流安全系数(CSF)。

在 PV 相关文献中,PV 发电装置容量通常用日负荷 L 进行归一化:

$$C_a = \frac{N_{sG} \times N_{pG} \times P_{maxGr}(\overline{PSH})}{L} \tag{7-15}$$

例 7.3 计算如下 PV 系统 N_{sG} 和 N_{pG} 值:使用地为美国萨克拉曼多市,负载条件为 24V 直流输出,负载能量为 2000Wh/天,PV 表面朝南,倾斜角为 40°。萨克拉曼多[7.4]的可用阳光辐射条件见表 7-1,单位为 kWh/(m^2 · 月)。系统中将要用到的 PV 模块在标准条件下（1000W/m^2, AM1.5, 25℃）特性为

$$P_{maxr} = 85W, V_{ocr} = 22.3V, I_{scr} = 5A, I_{mMr} = 4.72A, V_{mMr} = 18V$$

首先计算 I_{eq}:

$$L = 24 I_{eq} V_{cc} = 2000 Wh/d \tag{7-16}$$

$$I_{eq} = \frac{2000}{24 \times 24} = 3.46A \tag{7-17}$$

现在需要计算 PSH 的值，它从表 7-1 中通过计算平均日辐射值来得到，注意 1 月、3 月、5 月、7 月、8 月、10 月、12 月，每月有 31 天；4 月、6 月、9 月、11 月，每月有 30 天；2 月有 29 天。每个月的日辐射量见表 7-2。

表 7-1 萨克拉曼多市的辐射数据（CA）

月份	月辐射/[kWh/(m^2 · 月)]
1 月	88
2 月	113
3 月	159
4 月	185
5 月	208
6 月	208
7 月	222
8 月	217
9 月	199
10 月	169
11 月	107
12 月	83

表 7-2 日辐射值

月份	日辐射/[kWh/(m^2 · 天)]
1 月	2.83
2 月	3.89
3 月	5.12
4 月	6.16
5 月	6.70
6 月	6.93
7 月	7.4
8 月	7
9 月	6.63
10 月	5.45
11 月	3.56
12 月	2.67

表 7-2 中每月日辐射量的平均值是 5.35kWh/(m^2 · 天)。

考虑式（7-13）和式（7-14）中单个 PV 模块的参数值和假定安全系数为 1，得到

$$N_{sG} = 1.33$$

$$N_{pG} = 3.28$$

于是 PV 阵列可采用最接近实际值的尺寸为 4×2。可以看出，在实际中，由于只能取最接近的整数，因此 PV 模块串联和并联数分别增大 VSF = 1.5 倍和 CSF = 1.21 倍，从而增大了系统容量。

7.4 PV 系统中的日常能量平衡

7.3 节叙述了根据给定应用估算其 PV 阵列容量的过程，此方法可以扩展到所需蓄电池的容量计算。在一个独立 PV 系统中，蓄电池一般要满足以下 3 个任务的需要：

1）满足给定时间内的负载需求和功率输出瞬时值不同（功率失配）的要求。

2）满足夜间负载的能量需求（夜间负载）。

3）如果系统年度内完全自足，蓄电池必须满足季节性能量不均的要求。

当然，蓄电池容量设计和给定应用中电力供应的可靠性要求有关。确定蓄电池容量之前，首先举例说明对于确定某天内 3 种不同负载曲线的系统能量平衡问题。

7.4.1 瞬时功率失调

如果关注一天的能量动态，经常有如下情况：负载所需功率与同一时刻 PV 发电装置产生的功率不完全相等。当 PV 发电装置产生的能量过多时，如果蓄电池未充满，多余的能量将储存到蓄电池中；如果蓄电池已经充满电，PV 系统管理电路通常断开 PV 阵列连接，以避免蓄电池过度充电。同样，在这个时间段内，负载需要的能量大于当前产生的能量，那么电池必须提供缺少的能量。

在给定时刻，PV 发电装置输出的可用能量 $P_G(t)$ 取决于光照强度和温度以及负载接口（如保护和功率调节设备等）的特性。

在时刻 t，如果负载需要的瞬时功率是 $P_L(t)$，给定时间内的能量平衡为

$$E(t) = \int_0^t [P_G - P_L(t)]\mathrm{d}t \tag{7-18}$$

这里，式（7-18）在分析时间段内的积分可能为正也可能为负。

为了解释这个概念，例 7.4 使用与例 7.1 相同的数据，每小时辐射和温度数据见附录 G 中的“temp _ jan _ 16. lib”文件，估算了巴塞罗那地区 1 月平均一天内的能量冗余或不足情况。

例 7.4　假设一个如图 7-4 所示的 PV 发电系统，由一个 PV 模块组成，向负载提供 12V 电压。为便于说明，设一天内负载所需能量之和与 PV 模块所提供的能量之和相等，其中 PV 模块具有 7.1 节所描述的特性。本例中，假定所有时刻负载消耗的功率为定值，即负载开关常闭。系统没有用最大功率点跟踪器。发电系统被蓄电池钳位在 12V，这一天所产生的能量为 176.5W。

1）计算负载电流。

在 12V 时，负载电流由下式确定：

$$I_L = \frac{\int_0^{24} P_L \mathrm{d}t}{V_{cc}24} = \frac{176.5}{12 \times 24} = 0.612\mathrm{A} \tag{7-19}$$

2）计算负载的等效电阻值：

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} = 19.6\Omega \tag{7-20}$$

3）写出 PSpice 网表文件，如下：

```
*mismatch.cir
.include irrad_jan_16.lib
.include temp_jan_16.lib
.include module_beh.lib
xtemp 43 0 temp_jan_16
xirrad 42 0 irrad_jan_16

xmodule 0 42 43 44 45 46 47 48 49 module_beh params: iscmr=5,coef_iscm=9.94e-6,
+vocmr=22.3, coef_vocm=-0.0828, pmaxmr=85,noct=47,immr=4.726, vmmr=17.89,
+tr=25, ns=36, np=1

vbat 44 0 dc 12
rload 44 0 19.6
.tran 0.01u 24u 0 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end
```

4）运行 PSpice，得到蓄电池输入、输出能量的最大值和最小值，结果如图 7-5 所示。

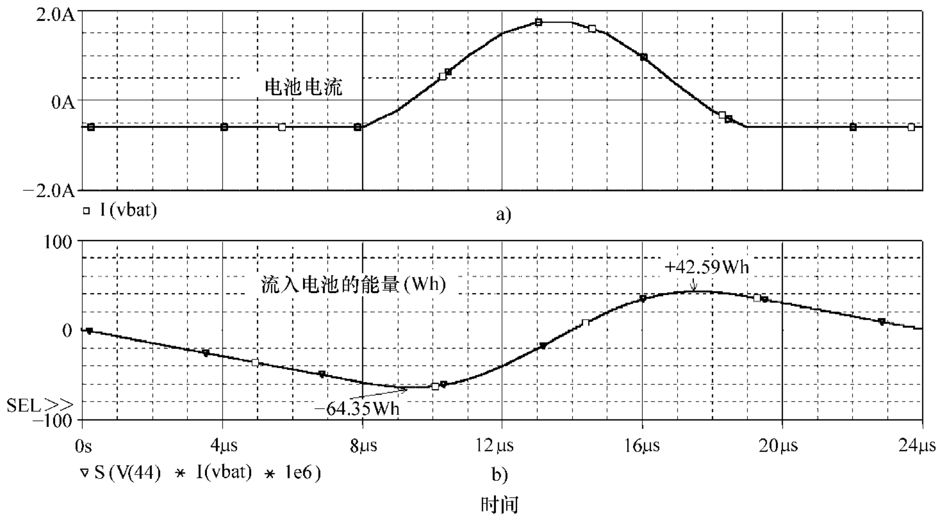


图 7-5　例 7.4 中 mismatch. cir 文件的结果

a）电池电流；b）流入电池的能量

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实时间单位 1 小时（1μs = 1h）。

从图 7-5a 可以看到蓄电池电流的时间曲线。日出前和日落后的电流为负，这表明在 PV 模块没有产生电能时有一个从电池到负载的电流。图 7-5b 所示为蓄电池电压与电流乘积的积分值，表示在时刻 t 流入或者流出电池的能量：

$$E_{bat} = \int_0^t I_{bat} V_{cc} dt \tag{7-21}$$

运用光标，可以读出能量最大值为 +42.99Wh，最小值为 -64.35Wh。可以看出，和设计一样，在一天结束时的净流量为零，系统完全平衡。容易证明 PV 发电装置输出电流的时间积分乘以 12V 为 176.5W，为式（7-19）所用到的值，与这天负载所消耗的能量相等。

例 7.4 的结果表明，蓄电池容量应至少为 64.35Wh + 42.99Wh = 107.34Wh，这就是蓄电池的日循环能量。

7.4.2　夜间负载

显然，并不是所有负载都像前面例子的情形一样整天都消耗能量。实际上，许多独立 PV 系统中负载主要在夜间消耗能量。一种极端情况为所有能量都被负载在夜间消耗掉。如果使用例 7.4 中相同的数据，但负载调整为夜间负载（19：00 ~ 23：00），并且保持消耗的总能量为前例中的 176.5Wh/天，那么需要引入对应的修改，求新的负载阻抗的具体步骤为

$$I_L = \frac{\int_0^{24} P_G dt}{V_{cc} 4} = \frac{176.5}{12 \times 4} = 3.677\text{A} \tag{7-22}$$

和

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} = 3.263\Omega \tag{7-23}$$

相应的也需要修改 PSpice 文件，主要是只在夜间接入负载电阻。使用图 7-4 所示的与负载串联的开关，并使用控制信号驱动它。可以通过在网表中增加下面几行内容来实现：

```
rload 80 0 3.263
sload 74 80 81 0 switch
.model switch vswitch roff=1e8 ron=0.01 voff=0 von=5
vctrl 81 0 0 pulse (0,5,19u,0,0,4u,24u)
```

其中开关模型有非常小的导通电阻（0.01Ω），而不是默认值 1Ω。这是由于这个小的阻值也会成为负载的一部分，占用一定数量的负载所需功率。这种情形下，运行附录 G 中的文件“nightload.cir”后，仿真结果如图 7-6 所示。

可以看出电池白天接受能量（176.5Wh）并在夜间的 4h 内消耗到负载上。

这种情形下电池所需的容量为 176.5Wh。

7.4.3　日间负载

分析第 3 种情况（见习题 7.1）：负载仅在白天消耗功率。假设消耗时间全长为 8h，即 8:00 ~ 16:00，负载电流的值为

$$I_L = \frac{\int_0^{24} P_G dt}{V_{cc} 8} = \frac{176.5}{12 \times 8} = 1.838\text{A} \tag{7-24}$$

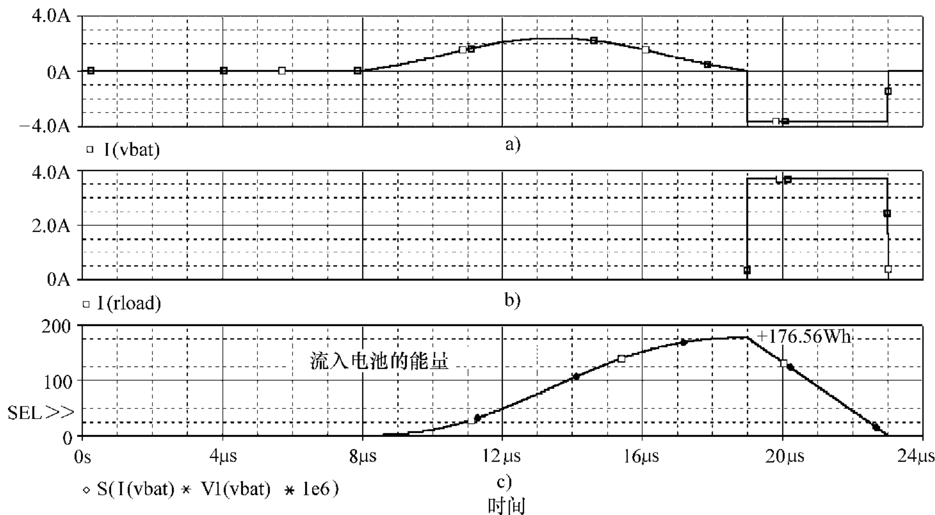


图 7-6　夜间负载情形下的能量平衡曲线

a）电池输入输出电流曲线　b）负载电流曲线　c）电池接受的能量曲线

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实时间单位 1 小时（1μs = 1h）。

负载电阻为

$$R_L = \frac{V_{cc}}{I_L} = 6.528\Omega \tag{7-25}$$

按照附录 G 中的 PSpice 文件“dayload. cir”计算能量，其结果如图 7-7 所示。

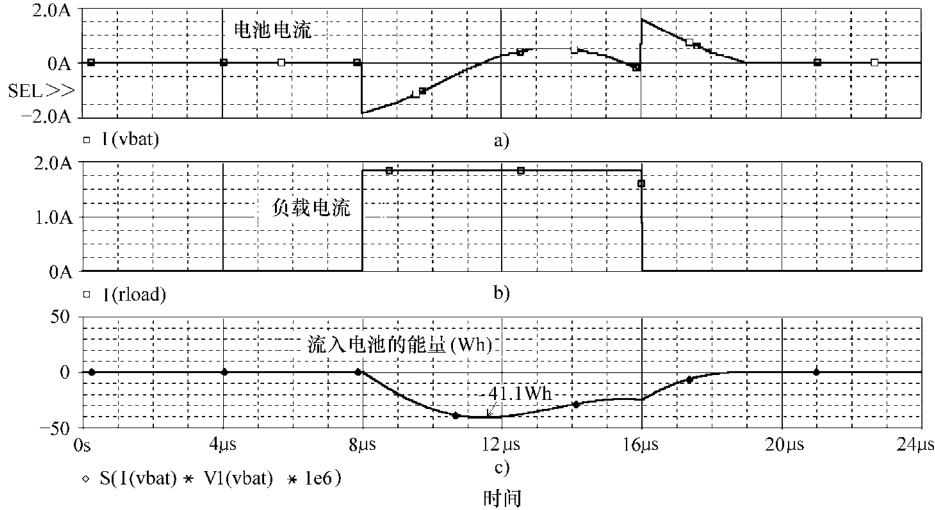


图 7-7　日间负载情形下的能量平衡曲线

a）电池输入、输出电流曲线　b）负载电流曲线　c）电池接受的能量曲线

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位 1 小时（1μs = 1h）。

可以看出，最大放电深度为 -41.1Wh，是所分析的 3 种情况中最小的。可以得出这样的结论：日常能量平衡对不同的情况有不同的响应，必须在设计阶段考虑这一问题。

7.5　PV 系统的季节性能量平衡

绝大多数独立 PV 系统的要求是全年内能够自足。由于储存在蓄电池中能量的季节性波动，对蓄电池容量增加了几个要求。为了使用 PSpice 分析这个问题，设置一个 PWL（分段线性化）源来描述光照强度，其值由 PV 阵列平面（表面倾斜）的每月辐射值构成。使用 7.2 节中峰值日照时数（PSH）的概念，表 7-3 中的数据表示美国萨克拉曼多市每月的 PSH 值。

表 7-3　每月 PSH 值

月份	月辐射/［kWh/（m^2·月）］
1 月	88
2 月	113
3 月	159
4 月	185
5 月	208
6 月	208
7 月	222
8 月	217
9 月	199
10 月	169
11 月	107
12 月	83

转化为 PWL 源如下：

```
.subckt monthly_radiation 12 10
Vradiation 12 10 pwl 0u 0,0.99u 0,1u 88,1.99u 88,2u 113,2.99u 113,3u
+159,3.99u 159, 4u 185,4.99u 185, 5u 208,5.99u 208,6u 208,6.99u 208, 7u
+222,7.99u 222, 8u 217,8.99u 217,9u 199,9.99u 199, 10u 169,10.99u 169,
+11u 107,11.99u 107, 12u 83,12.99u 83,13u 0
.ends monthly_radiation
```

这里，1 月从 1μ 持续到 1.99μ，以此类推，去代表每月的辐射值。每月产生的能量由下式求得：

$$(E_{gen})_{month} = N_{sG} \times N_{pG} \times P_{maxGr} \times (PSH)_{month} \tag{7-26}$$

某月内消耗的能量由下式得出：

$$(E_{cons})_{month} = n_i (E_{cons})_{day} \tag{7-27}$$

式中，n_i为每个月的天数。

每月平衡能量由下式得出：

$$E_{\text{balance}} = (E_{\text{gen}})_{\text{month}} - (E_{\text{cons}})_{\text{month}} = N_{\text{sG}} \times N_{\text{pG}} \times P_{\text{maxGr}} \times (\text{PSH})_{\text{month}} - n_i (E_{\text{cons}})_{\text{day}} \quad (7\text{-}28)$$

使用附录 G 中的 PSpice 文件“seasonal. cir”可以轻易求得。当 $N_{\text{pG}}=3$ 和 $N_{\text{pG}}=4$ 时的萨克拉曼多的示例结果如图 7-8 所示。

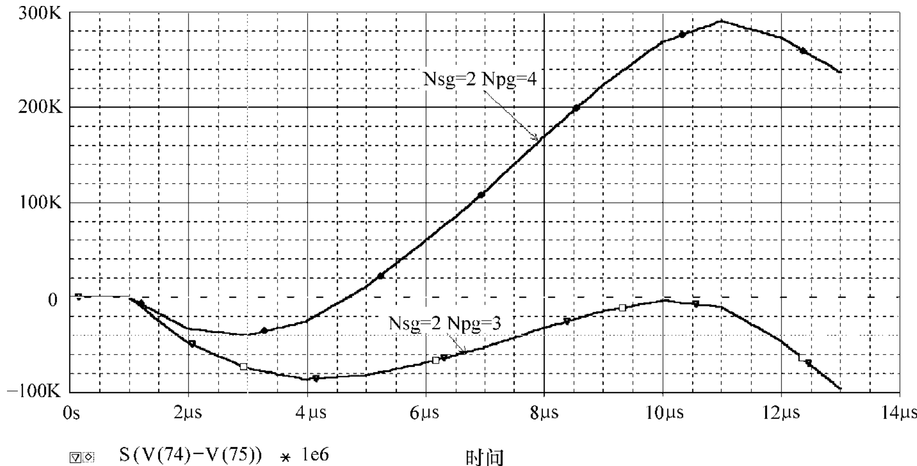


图 7-8 季节能量平衡

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位 1h（1μs 代表 1 个月）。

可以看出阵列结构为 2×4 时，一年中的季节能量缺额最大值为 40294Wh，而配置为 2×3 时的能量缺额更大。当然，这个结果也取决于 PV 发电装置的表面朝向。正如第 1 章所描述，一年内可利用的总能量和每月变化很大程度上取决于 PV 发电装置的表面朝向。观察图 1. 10 和图 1. 11 中的辐射数据，采用倾斜接近于纬度的角度会优化一年内收集的能量，也减少了最大值和最小值之间的差异。

7. 6 独立 PV 系统中的电池容量简化计算方法

我们已经明白在一天和一年两个时间框架内能量是怎样流入和流出理想蓄电池的，并且考虑独立 PV 系统中蓄电池所实现的功能，可以由下式来简单地估算蓄电池需要的容量：

$$E_{\text{battery}} = \left\{ \text{MAX}\left[(E_{\text{balance}})_{\text{max}} + E_{\text{backup}}, E_{\text{cycle}}\left(\frac{1}{x}\right) \right] \right\} \frac{1}{y} \frac{}{\eta_{\text{cd}}} \quad (7\text{-}29)$$

式中，E_{backup}是应对没有太阳能发电时，系统运行特定天数内所需的储存能量（由于系统故障、维护或者一些连续工作日太阳辐射很少）；

$(E_{\text{balance}})_{\text{max}}$表示全年运行时的最大季节缺额；

E_{cycle}表示由于功率失配或夜间负载引起的能量缺额，x 表示电池日循环系数；

y 表示最大放电深度系数；

η_{cd}表示电池充电放电效率。

这些是电池容量的主要参数。式（7-29）单位为 Wh，大部分蓄电池容量单位为 Ah，故：

$$C = \frac{E_{\text{battery}}}{V_{\text{cc}}} \tag{7-30}$$

在 PV 术语中，电池容量也通常由每日负载 L 来进行归一化，即

$$C_{\text{s}} = \frac{E_{\text{battery}}}{L} \tag{7-31}$$

其中，C_{s} 的单位是 d。

例 7.5　计算萨克拉曼多市一个每天提供给负载 3000Wh 能量的 PV 系统的蓄电池容量。PV 阵列是一个 2×4 的 PV 组件阵列，PV 模块特性与例 7.1 相同。设定日电池能量循环量要小于 15%，最大放电深度为 80%，充放电效率为 95%。假设配置两个其他的相似 PV 阵列，一个为 3×2，另一个为 5×2，绘出 $C_{\text{a}}-C_{\text{s}}$ 曲线。

使用 7.5 节中萨克拉曼多市的辐射值，首先用 7.5 节中的方法计算季节性缺额，得到

$$E_{\text{seasonal}} = 40294\text{Wh} \tag{7-32}$$

选择 5 天的备用储存，为

$$E_{\text{backup}} = 5 \times 3000 = 15000\text{Wh} \tag{7-33}$$

取 $x = 0.15$，日循环的最大缺额是没有太阳辐射被转换时，取日循环最大可能值 3000Wh/天，有

$$E_{\text{battery}} = \left\{\text{MAX}\left[40296 + 15000, 3000\left(\frac{1}{0.15}\right)\right]\right\}\frac{1}{0.8}\ \frac{1}{0.95} = 81317\text{Wh} \tag{7-34}$$

和

$$C_{\text{s}} = \frac{E_{\text{battery}}}{L} = \frac{81317}{3000} = 27.1 \tag{7-35}$$

$$C_{\text{a}} = \frac{N_{\text{s}} \times N_{\text{p}} \times P_{\text{mp}} \times (\overline{\text{PSH}})}{L} = \frac{2 \times 4 \times 85 \times 5.35}{3000} = 1.21 \tag{7-36}$$

如果使用相同的网表，N_{p} 从 3 变化到 6，运行其他两个 PSpice 程序，得到表 7-4 所示的结果，绘出曲线如图 7-9 所示。可以看出，对于同一个系统，阵列容量和电池容量之间有平衡关系。

表 7-4　几个系统配置的季节能量缺额

$N_{\text{p}} \times N_{\text{s}}$	C_{a}	季节能量缺额/Wh	从季节能量缺额计算的 C_{s}（包括 5 天备用存储）	从等式 7-36 计算出的 C_{s}
3×2	0.909	14 5647	48.54	48.54
4×2	1.21	40 296	27.1	27.1
5×2	1.51	18 162	14.54	14.54
6×2	1.81	3 255*	7.11	8.71

注：季节缺额随日循环量减小而增加。

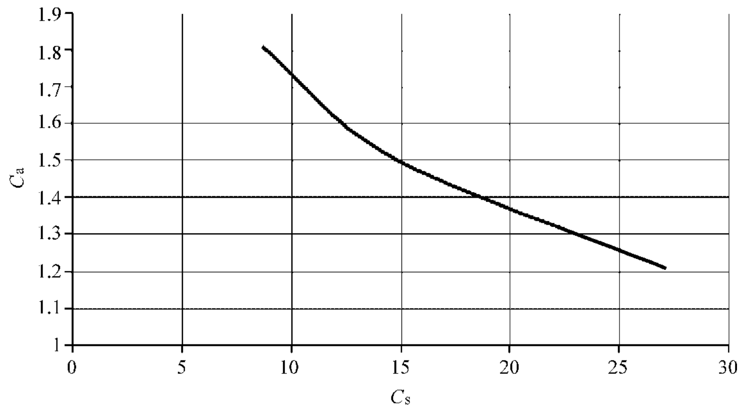


图 7-9　例 7.5 的 $C_a - C_s$ 曲线

7.7　随机辐射时间序列

PV 组件和阵列被放置在适当的表面，通常不是水平放置，而是有一个倾斜角。太阳能系统设计通常需要每月平均辐射量的值，在一些情况下设计工具还需要每小时的辐射数据。对于世界上一个特定地区，这些信息可以通过监测辐射值和来自世界范围内大气层观测站的可利用的气象数据得到。这些观测站的数据主要涉及水平表面的总辐射和漫辐射，为了计算一个斜面上每天或者每小时的总辐射、直射辐射和漫辐射，必须应用相应的方法和模型。这些工具的目的在于产生一个数据的时间序列，与监测的可利用的数据具有相同的统计特性。例如，METEONORM 工具使用其中的一个方法，特别是使用 Collares – Pereira[7.5] 模型，该模型采用马尔科夫链得到每天的数值，而每小时的数值可以从这些每天的数值中得到。

PV 系统设计者更关心这些典型辐射时间序列的实用性，以便更精确地计算系统的容量和评估可靠性。7.8 节将使用合成的辐射时间序列运行长期仿真来估计负载不足概率。在本节，例 7.6 说明了这些辐射时间序列的特点。

例 7.6　写出一个 PSpice 子电路文件，描述一个位于马德里（西班牙），北纬 40.39°，朝南倾斜度为 40°的 PV 系统随机产生的一年的辐射时间序列。

数据序列的结果从 METEONORM 中得出，名为“madrid. st1”的激励文件可以从这本书的网站上得到。. cir 文件描述的时间序列如下：

```
*madrid.cir
.include madrid.stl
v1 1 0 stimulus vmadrid
r1 1 0 1
.tran 0.1u 365u 0 0.1
.probe
.end
```

一年 365 天的结果如图 7-10 所示。注意，为了加快仿真速度，PSpice 内部时间单位设置为 μs，与真实时间单位中的一天对应。

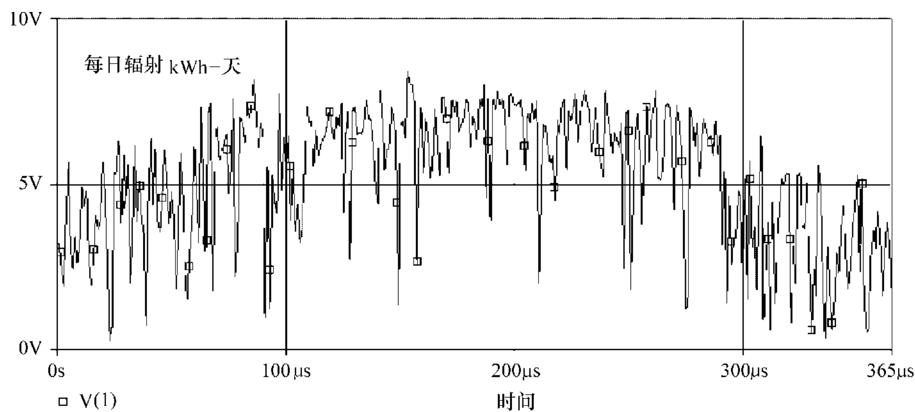


图 7-10　由 METEONORM 产生的随机日辐射数据的 PSpice 图

注：x 轴是时间，其单位为 PSpice 内部单位 μs，对应真实单位天（1μs = 1d）。

这个时间序列与所监测的时间序列有相同的平均值、方差和自相关。

而且，每小时的辐射数据也可以从商用软件中得到，和例 7.6 中的每日辐射值一样，输出文件可以通过改变格式转换为 PSpice 激励文件。

针对位于马德里，倾斜角为 40°条件下，使用 METEONORM[7.4] 所产生的用 PSpice 绘制的每小时辐射数据如图 7-11 所示。为了清晰起见，图 7-11 只给出了前 10 天的数据。可以看出，时间轴单位为 PSpice 的内部单位 μs，与真实时间单位的小时对应（1μs = 1h）。

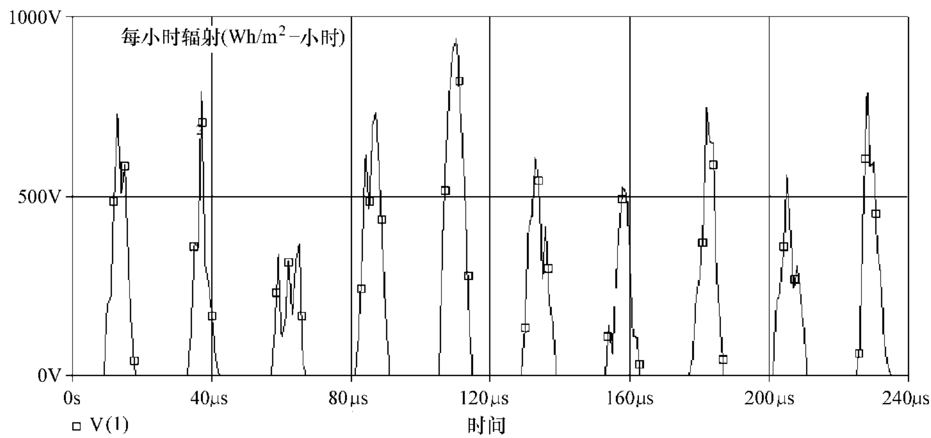


图 7-11　运用 METEONORM 软件产生的前 10 天的每小时的辐射值所绘制的 PSpice 曲线。倾斜角朝南 40°

注：x 轴是时间，其单位为 PSpice 内部单位 μs，对应真实单位小时（1μs = 1h）。

使用程序“stimulus”文件，可以产生长期时间辐射数据序列，有助于 PV 系统的仿真，这将在下面的章节中说明。

7.8 负载不足概率

设计 PV 系统容量的高级工具经常使用一个参数叫负载不足概率（LLP）。这个参数定义需要对系统运行方式进行简化假设。如图 7-12 所示，PV 发电装置和辅助发电装置（例如柴油发电装置）都与负载连接。定义 LLP 时通常假定负载仅在夜间消耗功率，辅助发电装置提供系统补充到完全充电所需的能量。

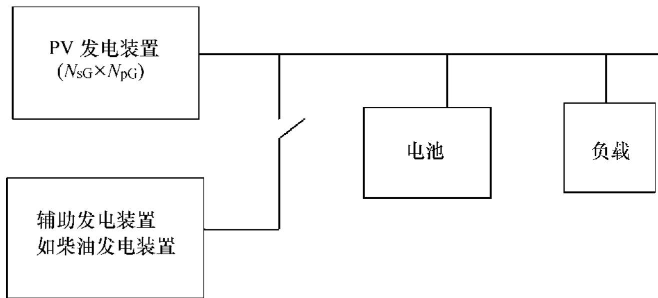


图 7-12　具有辅助发电装置的 PV 系统

那么，LLP 定义为

$$\mathrm{LLP} = \frac{\sum E_{\mathrm{aux}}}{N \times L} \tag{7-37}$$

式中，N 是所分析的天数。为了计算给定系统的 LLP 的值，通常程序使用的是很多天（通常超过一年）内随机产生的辐射数据时间序列。然后执行仿真去计算每天结束时和负载接入前电池储存的能量。如果储存的能量比每天的负载 L 多，那么就不连接辅助发电装置；相反，如果储存的能量比 L 小，那么连接辅助发电装置并且提供差值能量直到电池充满电。在这 N 天之内，通过辅助发电装置提供的能量可以计算出 LLP 的值。

PSpice 程序执行时需要进行一些数据处理，来重现 LLP 定义中所预计的事件序列。图 7-13 中可以看到，一个等效脉冲反映了实际一天产生的能量，负载消耗也是同样由一个每天结束时的脉冲来实现。在这两者之间，当一天内所产生的能量脉冲结束时刻，电池储存的能量比典型负载所消耗的能量小时，需要辅助发电装置去提供额外的能量。采取的措施是起动柴油发电装置或者任何其他一种辅助发电装置发电来充满电池。完整的过程和结果见例 7.7。

例 7.7　利用巴塞罗那地区随机产生的一年的日辐射量的时间序列，仿真恒定负载为 2000Wh/d、$N_{sG}=2$ 和 $N_{pG}=5$ 的一个 PV 系统。PV 模块在标准日照条件下的最大功率是 85W。初始储存能量为 20000Wh。

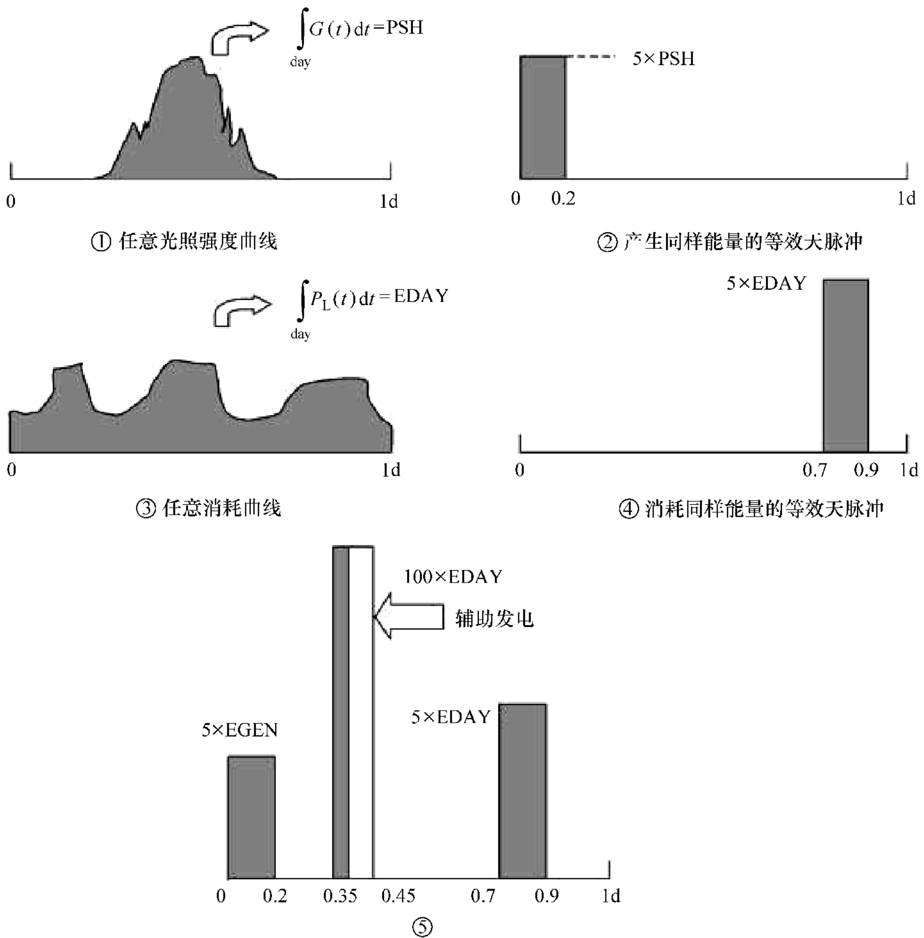


图 7-13　计算 LLP 的等效天模型

1）设置发电脉冲，宽度为 20% 日长，幅度为日发电量的 5 倍。

可以由下面的 PSpice 文件来完成：

```
.subckt generation 700 730 731 740 params: pmaxr=1, nsg=1, npg=1
* Sample and hold circuit
sw1 731 720 711 700 switch
.model switch vswitch roff=1e8 ron=0.0001 voff=0 von=5
vctrl1 711 700 0 pulse (0,5,0,0,0,0.01u,1u)
csh 720 700 10u
sw2 720 700 721 700 switch
vctrl2 721 700 0 pulse (0,5,0.2u,0,0,0.01u,1u)
* end of Sample and hold
ggen 700 730 value={5*v(720)/1000*pmaxr/1000*nsg*npg}
egen_out 740 700 value={sdt(1e6*5*v(720)/1000*pmaxr/1000*nsg*npg)}
.ends generation
```

它具有 2 个功能：

① 是使用如图 7-14 所示的采样和保持电路产生的一个日辐射脉冲。可以看出，当采样开关闭合的时，采样鉴相器在很短时间内跟踪辐射信号的值，并一直保持这个值直到放电开关闭合。

② 运用 5 倍于日负荷（ggen）的幅度产生一个等效电流脉冲，计算时间积分值（egen）。

2）建立负载脉冲和辅助发电装置脉冲文件。

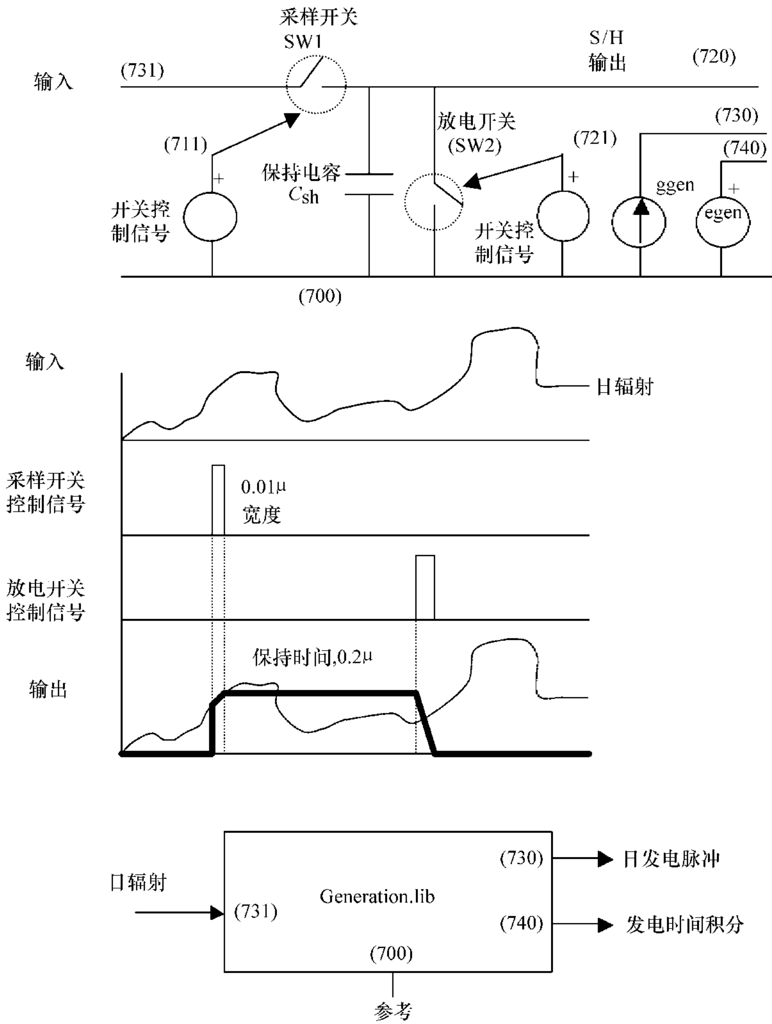


图 7-14　包含采样保持电路的电流源（ggen）和时间积分源（egen）生成电路

负载脉冲通过图 7-15a 所示的电路产生，该电路由附录 G 中的 PSpice 文件“cons. lib”实现，辅助发电装置产生的辅助能量脉冲可以通过图 7-15b 所示电路实现，该电路由同样在附录 G 中的 PSpice 文件“aux _ gen. lib”描述。

这个文件中的采样和保持电路有控制的作用，当储存的能量比每天负载消耗的能量小时，就保持该状态直到蓄电池完全被充满。

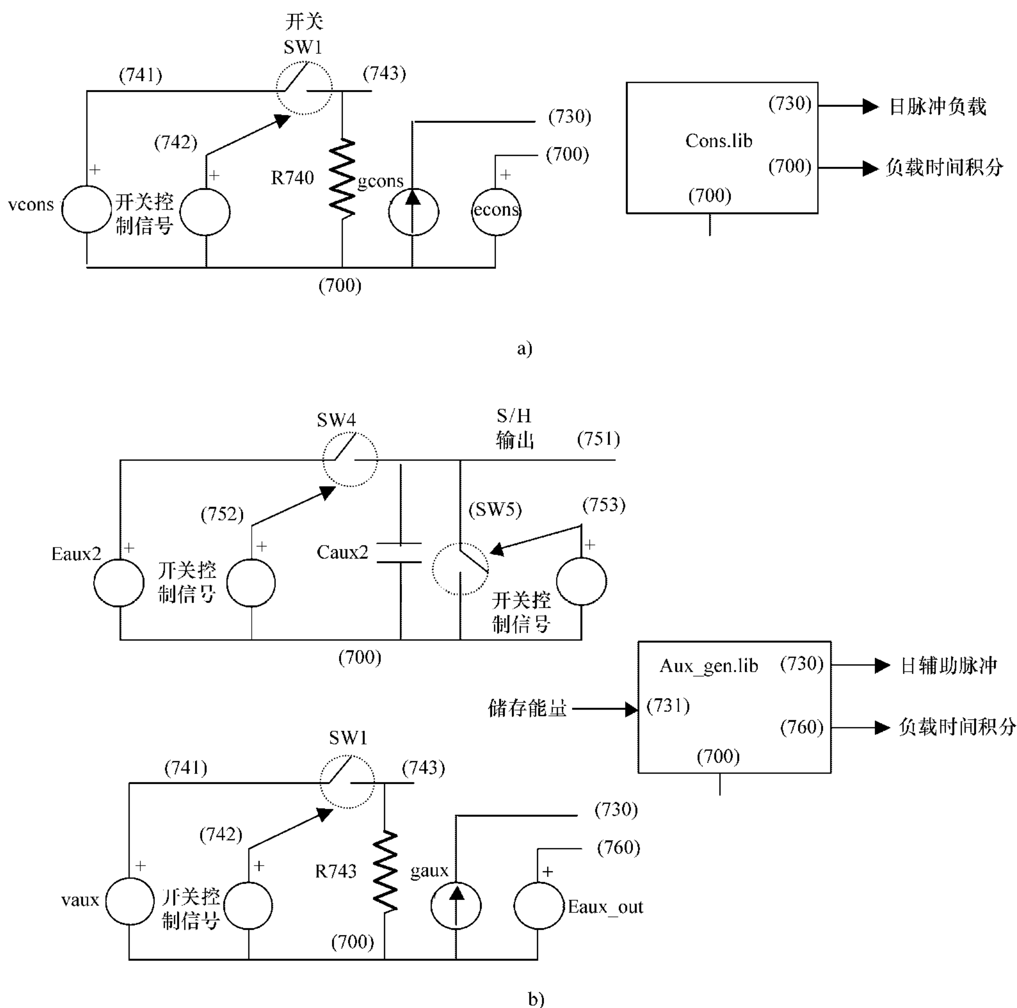


图 7-15　a）负载脉冲和负载时间积分的发生子电路；b）辅助发电装置脉冲

3）计算 LLP。

图 7-16 包括一年内日辐射的子电路（radiation _ 1year. lib）、发电子电路（generation. lib）、负载子电路（cons. lib）、辅助发电装置子电路（aux _ gen. lib），这些都在附录 G 的文件“llp. cir”中。LLP 的值在图 7-16 所示模块的帮助下计算得出。

可以看出，这里的电池模型用一个简单的电容表示，发电装置、负载和辅助发电装置能量脉冲都输送给电容（注：因为 PSpice 内部时间单位为 1μs，等同于真实时间一天，所以电容的单位值为 1μF），这意味着由电容实现时间积分，恢复原

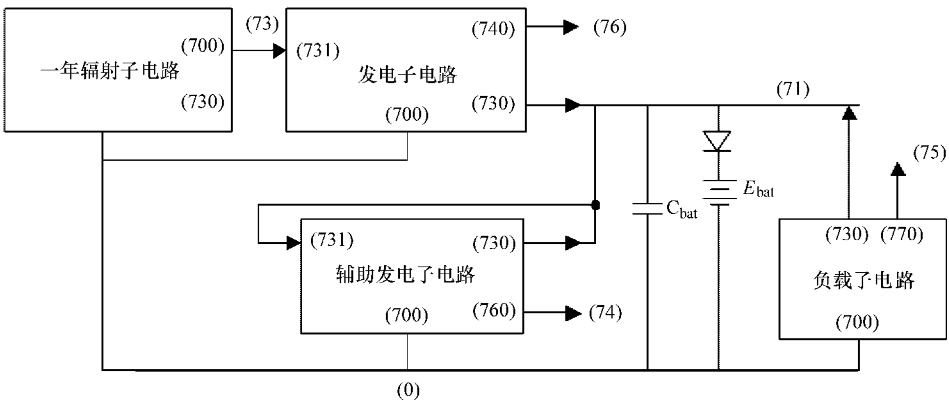


图 7-16　用于计算 PV 系统的 LLP 的 PSpice 框图

单位：

$$v(71) = \frac{1}{C_{bat}}\int[i(ggen) + i(gaux) - i(gcons)]dt \tag{7-38}$$

式中，$v(71)$的 PSpice 内部单位是 V，对应的真实单位为 kWh。图 7-17 所示为这一年中第 12、13 天的详细曲线。图中有发电装置、负载和辅助发电装置的能量曲线，电池储存的能量变化曲线显示在图下部。可以看到，能量的产生集中于一天内的前两个小时（也就是说生成脉冲的幅值必须乘以 5 以保持全天内接受到的总辐射量不变）。在发电脉冲结束之后，负载脉冲到来之前，系统会检查所储存的能量。如果能量比预计的日负荷小，那么辅助发电装置脉冲会向能量储存器充电。根据图 7-13，我们随意选择辅助发电脉冲幅值为日负荷的 100 倍，且宽度可变。如果不需要补充能量，则不连接辅助发电装置。

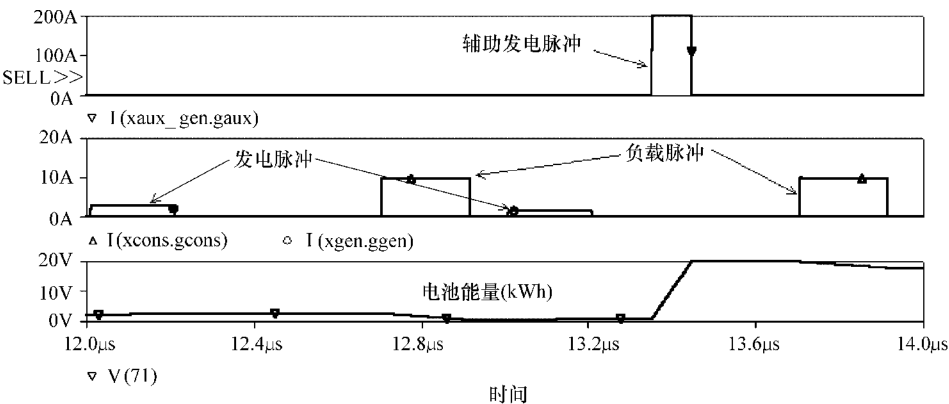


图 7-17　第 12 天的具体曲线，发电脉冲结束时所储存的能量比每天负载消耗的能量少，辅助发电装置会向电池充电

注：x 轴单位是 PSpice 内部单位（μs），对应真实时间单位小时（1μs = 1h）。

在图 7-17 所示的例子中，仅在第 13 天，由于接受的辐射低和剩余的能量少，需要连接辅助发电装置。

一年 365 天的全视图如图 7-18 所示，可以看到能量储存器需要 3 次完全充电。

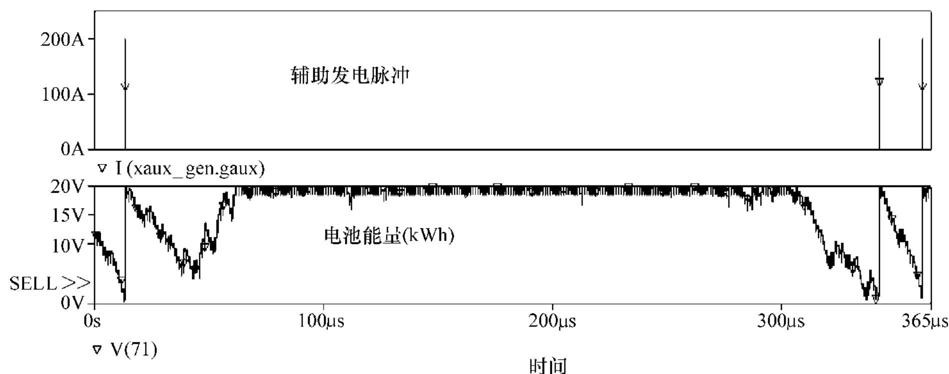


图 7-18　一年内随机产生的日辐射量的 LLP 值的计算

注：内部时间单位为 μs，对应真实时间单位 1d（1μs 代表 1d）。

辅助发电脉冲的时间积分如图 7-19 所示。PSpice 变量“eeaux”作为时间的函数显示在图顶部。

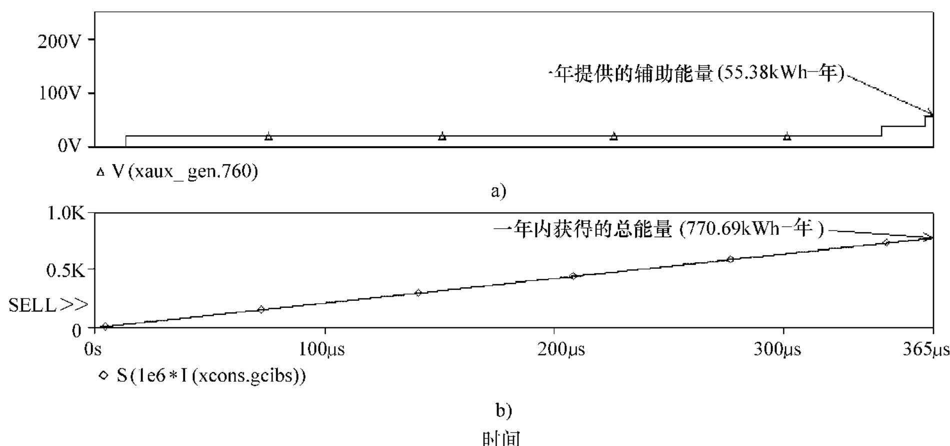


图 7-19　a）由辅助发电装置所提供的能量；b）从第 1 天到第 n 天消耗的能量

注：x 轴单位是 PSpice 内部单位（μs），对应真实时间单位 1d（1μs 代表 1d）。

为了在 LLP 计算中得到精确的值，也需要计算负载脉冲的时间积分，如图 7-19b 所示。一年需要的总辅助能量是 55.38kWh，总负荷是 770.69kWh。据此，可得 LLP 如下：

$$\text{LLP} = \frac{53.38}{770.69} = 0.0718 \tag{7-39}$$

也就是说这个系统中负载不足概率是 7.18%。可以看出总负荷能量不是等于

2kWh ×365 （ =730），而是 770. 68。这是由于负载脉冲上升和下降沿的时间非零所致。

从 LLP 定义中可以明确看出，通过选择一个容量比较大的电池或者一个更大尺寸的阵列，可以降低 LLP 值。

7.9 PSpice 仿真结果与监测结果对比

模型计算结果与监测数据的比较有助于评价所建立模型的精确性和有效性。使用长期的监测结果是不可能的，仅仅因为相似的设备数据难以取得。然而，如果使用相似型号的 PV 模型和蓄电池，调整相关的模型参数值，采用设备几天的监测数据就足够了。本节将进行这种比较。

例如，假设有一个常规的独立 PV 系统，由 PV 阵列、功率调节电子设备、电池和负载组成。

例 7.8 假设有一个由 8 个 PV 模块组成的独立 PV 系统（2 个串联、4 个并联），在标准的 AM1. 5 条件下，I_{scM} =2. 45A，V_{ocM} =19. 25V，与 12 块 ATERSA 公司（西班牙）生产的 7TSE70，额定电压为 2V 的电池单元相连。负载可以用一个电流源模型来模拟。这个例子的目的是在激励文件“irrad. stl”所描述的一个光照强度曲线条件下，仿真该 PV 的响应，并将其结果与以 PSpice 语言描述的监测结果文件“Imodapril. stl”（PV 阵列输出电流）和“vbatapril. stl”（监测电池电压）进行比较。这些文件可以从本书的网站中得到。

解：

写出 PSpice 网表（stand－alone. cir），以进行系统特性的仿真，如下：

```
***** stand_alone.cir

xmodule 0 1 2 3 moduleRs params: iscmr=9.8, tempr=28, vocmr=38.5,ns=66,np=4,
+nd-1,pmaxr-380
.inc moduleRs.cir

xbat1 3 0 7 batstd params: ns=12, SOCm=13200, k=.8, D=1e-5, SOC1=0.95
.inc batstd.cir

.inc irrad.stl
 vmesur 1 0 stimulus Virrad

.inc iload.stl

*** included real data files from monitoring process in order to compare results
.inc Imodapril.stl
im 10 0 stimulus modulecurrent
rmo 10 0 10 000
.inc vbatapril.stl
```

```
vcompara 8 0 stimulus vbattery
rc 8 0 10 00 000

if 3 0 stimulus load
.tran 1s311000s
.probe
.end
```

负载电流源“if”也由一个激励文件实现，并且来自于其所实现的真实监测数据（文件“iload. stl”），如图 7-20 所示。

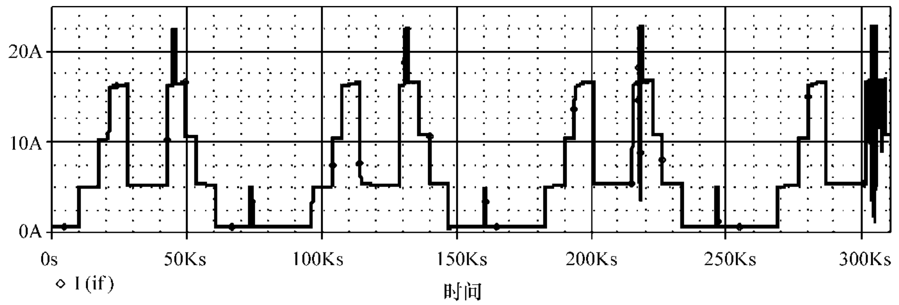


图 7-20　负载电流

本例仿真了上述的独立 PV 系统，并监测了巴塞罗那地区超过 3. 5d 的连续工作数据，并且每隔 2min 监测一次温度。光照强度如图 7-21 所示。

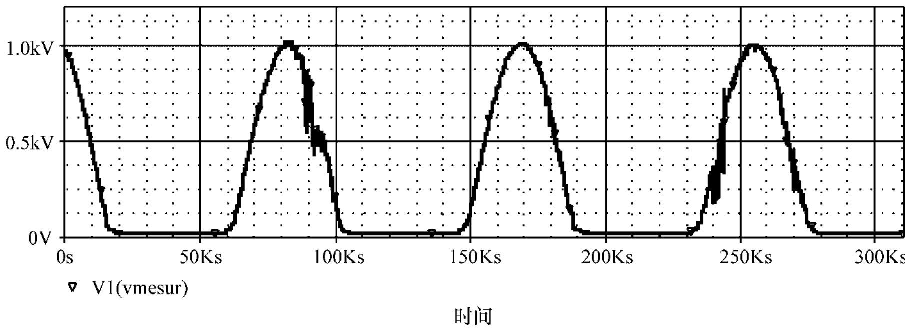


图 7-21　光照强度数据

图 7-22 对 PV 阵列输出电流的仿真值和监测值进行了比较。图 7-23 对电池电压的监测值和仿真值进行了比较。电池荷电状态变化如图 7-24 所示。

例 7. 8 所示的结果证明仿真结果正确，并且给出了在平均或者有限的工作条件下详细说明系统仿真的一种方法。

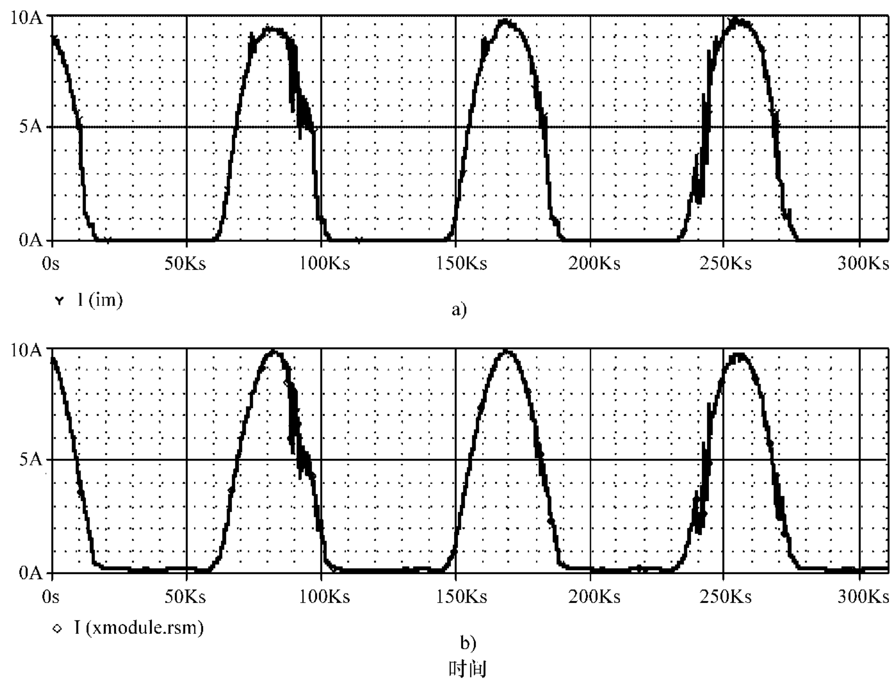


图 7-22 a）PV 阵列输出电流的监测曲线；b）仿真曲线

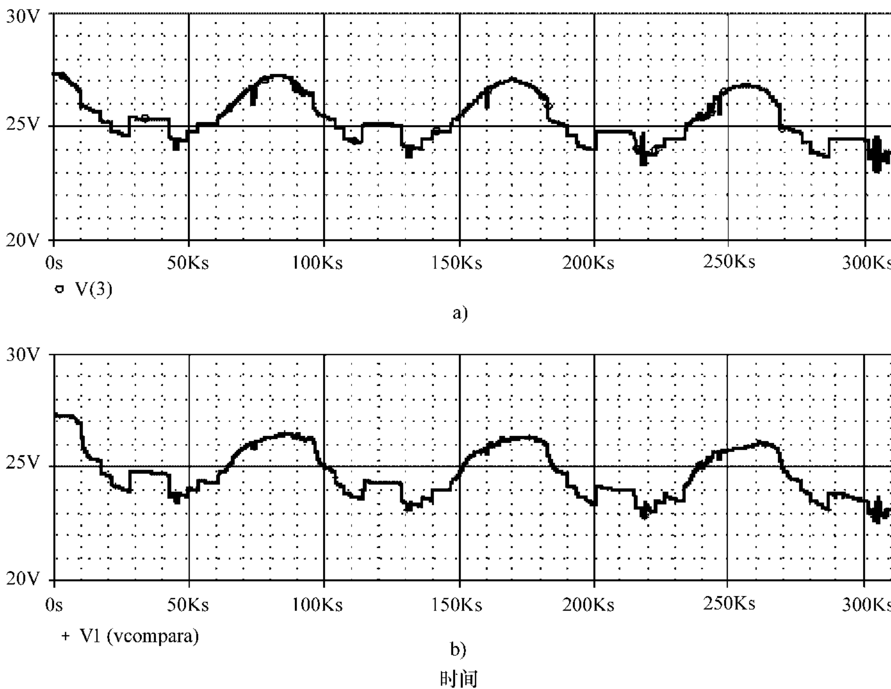


图 7-23 a）电池电压仿真；b）监测曲线

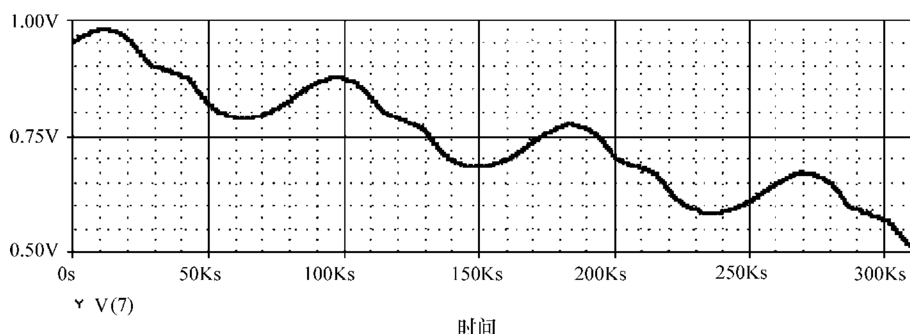


图 7-24　PSpice 仿真中的电池 SOC 变化

7.10　独立 PV 系统的长期 PSpice 仿真：一个案例研究

到目前，我们已经知道可以使用 PSpice 模型去估计 LPP 概率，去仿真一个 PV 系统的短期响应并比较仿真与监测结果。为了使所设计系统能满足长期情况下的电力需求，经常需要去估计一个给定 PV 系统的长期响应。由于需要处理大量的数据，并且要使用 PV 系统单元的精确模型（主要是 PV 发电装置和电池模型），使得这项任务变得困难。因为这两个模型是高度非线性的，并且求解其动态方程的数值解通常也是很费时的，还会遇到数值计算的收敛问题。

尽管 PSpice 本身就是一个处理非线性器件如二极管、晶体管或数字电路的工具，并且也能为使用者提供一些参数来有效地解决数值收敛问题，但收敛问题有时还会出现。读者必须注意第一次进行含有非线性器件的负载电路的瞬态仿真时，通常需要调整这些参数的值。

排除/解决这些问题后，长时间 PV 系统响应的仿真可以运用 PSpice 短计算时间来实现。也就是说，可以如本章和前面章节那样，PSpice 仿真中可以使用和真实时间单位不同的内部时间单位，下面将加以说明。

7.7 节中表明了长期的、具有统计意义的每月、每天或每小时辐射值的时间序列是广泛使用的（如果情况不是这样，读者可以参阅第 9 章用 PSpice 产生任意辐射时间序列的方法）。这些信息与相应的环境温度的时间序列可以输入 PV 发电装置模型，从而建立一个完整的 PV 系统，如图 7-25 所示。

可以看到，激励文件“madrid _ hour. stl”和“madrid _ temp. stl”输入到 PV 发电装置模块，PV 发电装置模块通过一个串联的二极管与一个电池模块和作为负载的电流源相连接。为了说明一年内系统的行为，不需要满功率调节和控制电路，只使用一个双极型晶体管开关进行溢出控制，当电池充电到某一特定值时，开关闭合。该溢出控制电路产生一个额外的负载电流。

假设马德里市有一个朝南并且倾斜角为 40°的独立 PV 系统，在 24V 时能够满

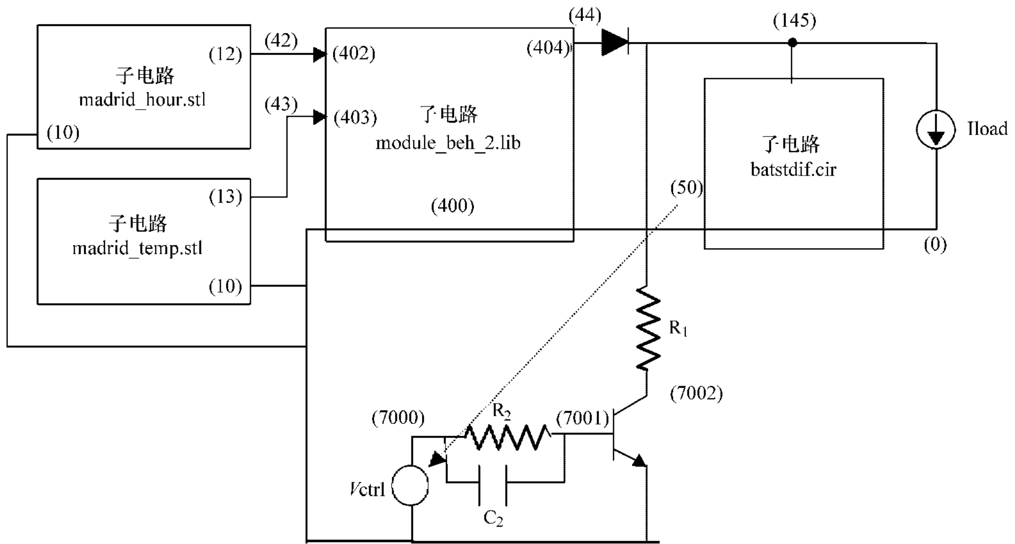


图 7-25　仿真 PV 系统长期响应的 PSpice 电路

足一个消耗为 3000Wh/d 的应用。

由式（7-10）可以算出负载等效电流是 24.761A。由 METEONORM 结果可知对应该地区和表面倾角的马德里平均辐射日负荷为每日 5.04kWh/m^2，串联和并联的 PV 模块的个数可以由式（7-13）和式（7-14）计算得到，近似整数值为 $N_{sG}=2$，$N_{pG}=6$。

如果使用文件“seasonal. cir”去估计来自每月辐射值的季节能量缺额，将会发现缺额为零，因此只需要考虑 5 天的能量储备和电池效率及日循环量，由式（7-29）即可估算电池容量：

$$E_{battery}=\frac{3000}{0.15\times0.95\times0.8}=26315\text{Wh}$$

此处假设日循环量为 15%，电池效率为 95%，最大放电深度为 80%。

基于这个假设，使用 MOTEONORM 软件产生任意光照强度和温度的每小时数据，可以进行一年时间的仿真。将使用以下文件：

1）“madrid _ hour. stl”，每小时辐射值；

2）“madrid _ temp. stl”，环境温度。

描述这个系统的完整网表是附录 G 中的“stand _ alone _ madrid. cir”文件。

这里使用的 PV 发电装置模型 generator _ beh. lib 为一个两级模型，包括一些预防措施以避免当光照强度接近零的时候出现数值不收敛问题，并在 . options 语句中修正了收敛参数。“generator _ beh _ 2. lib”的 PSpice 网表也在附录 G 中。图 7-26 所示为前 31 天的时间序列数据图，图 7-26a 为日辐射时间变化、图 7-26b 为环境温度，图 7-26c 为电池荷电状态。假设电池初始荷电状态是 90%。

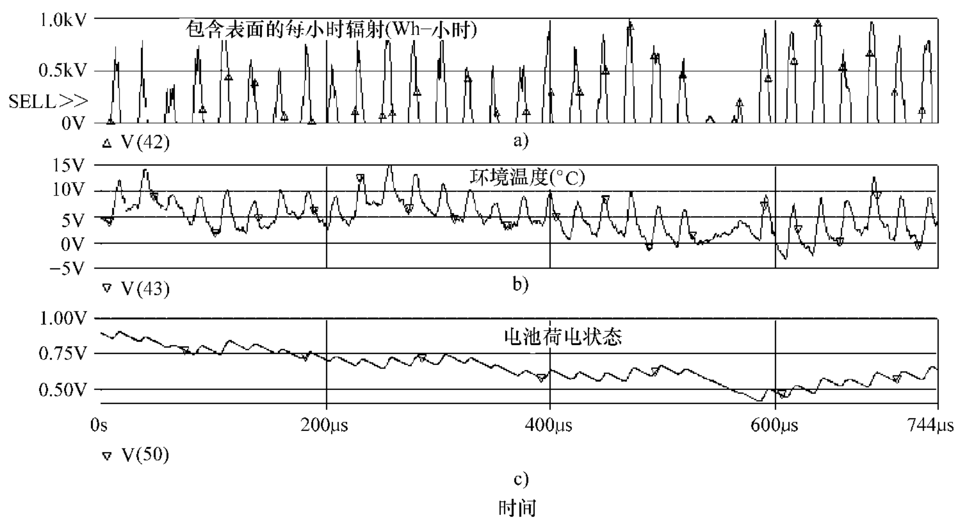


图 7-26 运用由 METEONORM 产生的随机每小时的光照强度和温度而得到的一个 PV 系统的 1 月仿真曲线

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位小时（1μs = 1h）。

可以看到，荷电状态在观察的时间内呈下降趋势，达到低于 50% 的水平。如果再看全年视图，当然会丢失一些细节，但是在图 7-27（荷电状态变化曲线和晶体管溢出电流曲线）中可以看到：系统除了年初和年末（太阳辐射最弱的月），大部分时间产生的能量比负载需要的能量多；可以很清楚地观察到系统运行状态和一个从电池到负载的净能量流动。

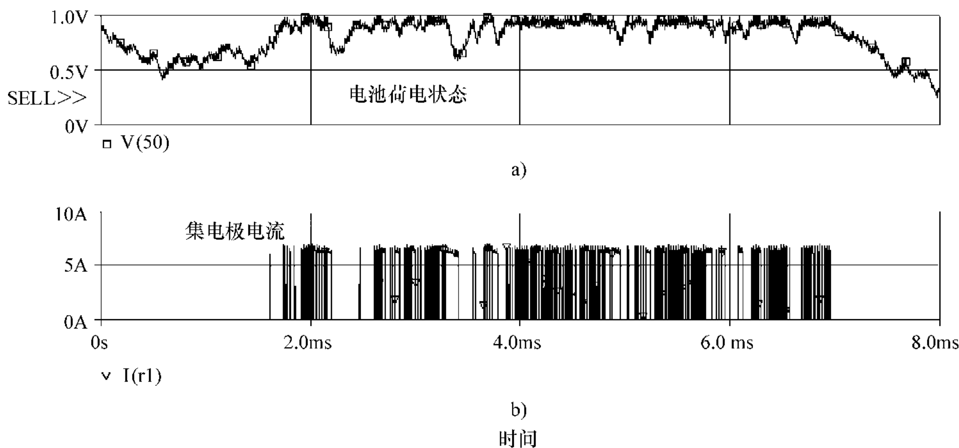


图 7-27 a）stand _ alon _ madrid 的荷电状态；b）溢出电流变化

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位小时（1μs = 1h）。

此外，溢出保护晶体管被强制要求随时抽走多余的电流以避免电池过度充电。

图 7-28 所示为一个 4 天时间 SOC 荷电状态和溢出电流的更详细视图。当 SOC 达到 95% 时，溢出晶体管开通并从系统中抽取电流。

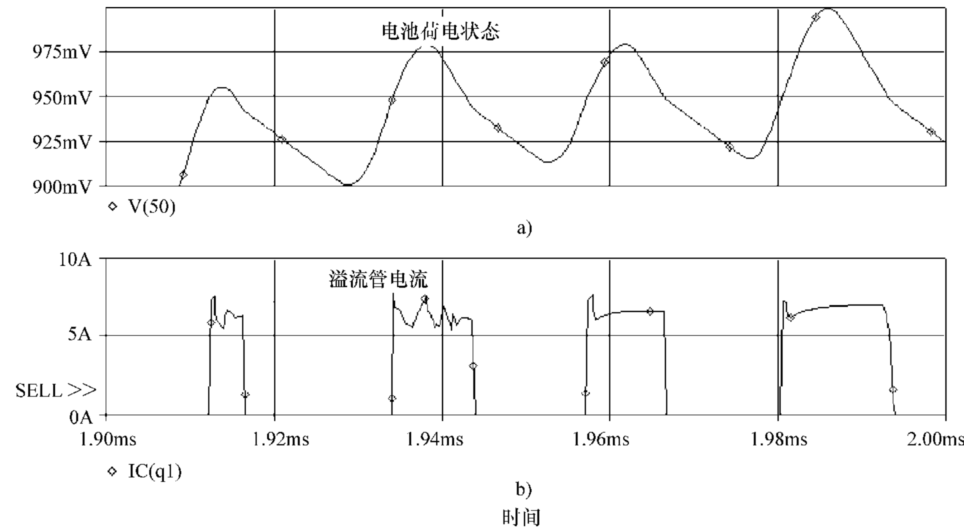


图 7-28　a）荷电状态变化；b）流过晶体管的溢出电流的详细视图

注：x 轴单位为内 PSpice 部单位（μs），对应真实单位小时（1μs = 1h）。

再观察图 7-27，可以看到在年末时 SOC 的值为 0.287。考虑到在图 7-27 所示的第一个月情况，下一个月也将是一个低辐射月，那么在第十二个月后仍然需要额外放电，可以得出结论：目前水平不足以保证全年的供给需要。如果电池容量增加 30%，系统在一年的运行过程中不会出现荷电状态的累计不足。

可以得出结论：这个过程可以使运用一种简单的方式去改善一个 PV 系统的容量。受限于 PC 性能，这一节中的仿真大约需要 1min 的 CPU 仿真时间。必须补充说明，这个系统中所用到的变化的数据可能需要调整收敛数值参数以及晶体管和二极管模型参数。最后一点与所使用的晶体管电路有关。由于内部时间单位是 μs，虽然在实际系统中晶体管会在一个小得多的频率上开关，但这里它必须在这个时标上完成开关。这意味着必须在图 7-25 所示的基本电路中增加一个虚拟加速电容。

7.11　水泵 PV 系统的长期 PSpice 仿真

水泵是在使用全自动抽水系统地区使用频率最高的 PV 应用之一。对于长期的仿真，需要一个水泵的准稳态模型，因为辐射度和温度的变化与电动泵的电气和机械时间常数相比是非常缓慢的。在本节中，将会进行一个直接与 PV 发电装置相连的水泵系统的年度仿真。

例 7.9　假设一个 PV 阵列由 10 × 4 的 PV 模块组成，在 AM1.5G 特性下：

$I_{sc}=5A$，$V_{oc}=23V$，coef _ vocm = 0.0828，$P_{max}=85W$，NOCT = 47，$I_m=4.726A$，$V_m=17.89V$，$n_s=36$

认为电动机和水泵的特性与第 5 章中的一样。使用 7.10 节所用到的一年辐射和温度文件，模拟这个系统产生的水流量。

首先简化适用于准稳态条件下的水泵电动机模型，也就是忽略依赖于时间的条件（包括 L_a，L_f 和 J）。在附录 G 中写为“pump _ quasi _ steady. lib”文件。

下一步，写一个包括辐射、温度数据和 PV 发电装置模型的“water _ pump. cir”文件，如附录 G 所示。

“madrid _ hour. lib”’和“madrid _ temp. lib”文件中的连续 12 天的随机序列所产生的流量如图 7-29 所示。

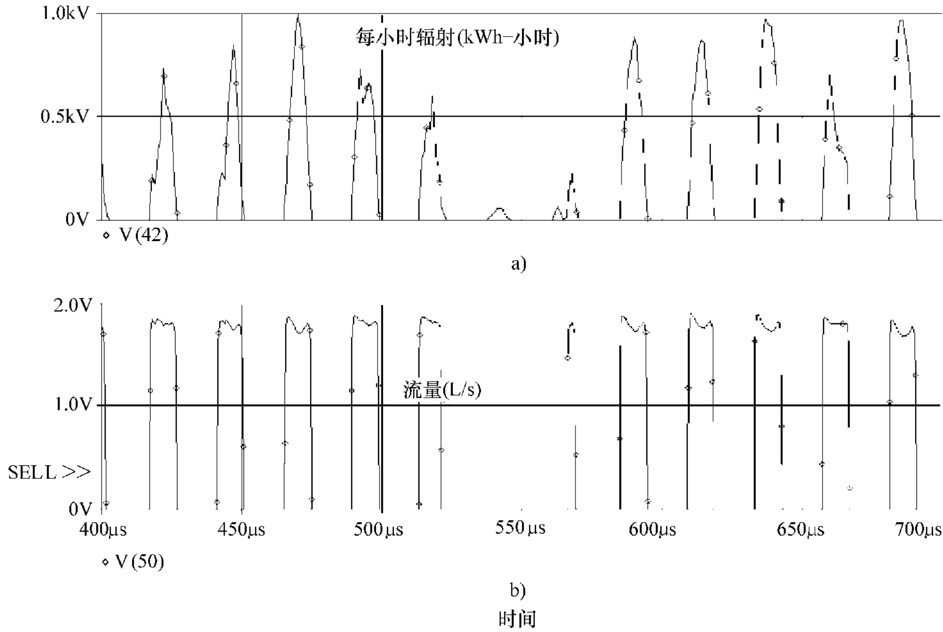


图 7-29　详细流量值（L/s）

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位小时（1μs = 1h）。

选择这幅图以说明在任意光照强度和温度条件下水泵是如何工作的。可以看出，12 天中有一天辐射很弱，电动机没有足够的能量起动。也可以看出，在下一天，尽管辐射也很弱，但是有足够的能量克服起动转矩，并能抽取一些水。

从年初开始抽取的总水量可以在节点（60）处得到，为流量的时间积分。在特定情况下，总抽水量为 20.41×10^6L/a，如图 7-30 所示。尽管这些非常耗时的仿真情况会出现，但实际上图 7-30 所示的涵盖了全年每小时辐射数据的仿真运行所用的 CPU 时间通常不到 1min。

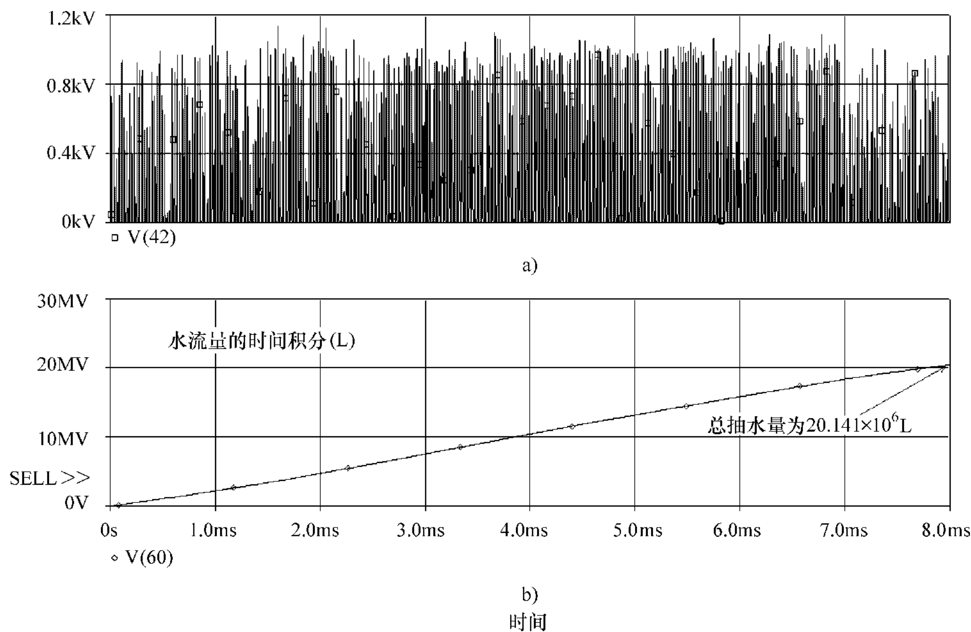


图 7-30　水泵系统的年度仿真

a）每小时的辐射值（单位为 kWh/m^2·天）；b）水流的时间积分

注：x 轴单位为 PSpice 内部单位（μs），对应真实单位小时（1μs = 1h）。

7.12　习题

7.1　假设 6 月的辐射度和温度曲线见表 7-5，使用此数据运行文件 psh. cir，计算例题中描述的 PV 模块产生的能量，并与那个月的 PSH 值相比较。

表 7-5　每小时辐射(kWh/m^2·h)

时间/h	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
辐射	0. 038	0. 122	0. 274	0. 433	0. 562	0. 654	0. 725	0. 725	0. 654	0. 562	0. 433	0. 274	0. 122

7.2　忽略式（7-11）中的取决于环境温度的条件，计算一个典型日 6 月 16 日的 PV 模块响应。计算并绘制最大功率点电压随时间变化的曲线。

7.3　使用表 7-1 中的萨克拉曼多市的辐射数据值，计算该年 12 个月的 PSH 值，并计算与例 6.1 有相同负载但用最坏情况（一年的最坏月）估算时的 PV 阵列容量。计算这种情况下的裕度系数。

参考文献

[7.1] Ministerio de Industria y energia, *Radiación Solar sobre superficies inclinadas*, Madrid, Spain, 1981.

[7.2] Markvart, T., Castañer, L. and Egido, M.A., '*Sizing and reliability of stand-alone PV systems*', 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 1722–24, Amsterdam April 1994.

[7.3] Egido, M.A. and Lorenzo, E., 'The sizing of standalone PV systems: a review and a proposed new method', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **26**, 51, 1992.

[7.4] Meteotest Meteonorm version 4.0, Switzerland, www.meteonorm.com.

[7.5] Aguiar, R. and Collares-Pereira, M., 'A simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices', *Solar Energy*, **40**(3), 269–79, 1988.

第 8 章　并网 PV 系统

摘要：并网 PV 系统开始在 PV 应用中扮演着十分重要的角色。本章介绍了一些有助于使用 PSpice 对并网 PV 系统进行仿真的 PSpice 逆变器模型和 AC 模块模型。对此类 PV 系统的估算和能量平衡的例子还可以看出，使用这些逆变器模型，PSpice 可以帮助工程师对系统行为进行很好的近似。短期和长期的仿真验证了估算方法的正确性。

8.1　介绍

从将在第 9 章描述的功率非常小的应用，一直到 MW 级的大型太阳能发电厂，PV 系统有广泛的应用范围。尽管 PV 系统有非常广泛的应用，但是其历来最重要的应用领域还是外太空 PV 系统和无法或难于从公共电网取得电能的地区的独立 PV 系统。

在过去的几年里，特别是在工业化国家，并网发电 PV 系统取得了重大进展。其原因除了 PV 发电的传统优势外，还有：

1）近年来，随着 PV 组件价格尤其是光电模块及逆变器的平均成本明显降低，实用并网 PV 系统变得更加经济可行。

2）PV 系统的逆变器和电网互联的相关技术问题已经由制造商解决，现在新一代逆变器具有更高的可靠性和更小的体积。

3）电力系统效益。事实上，太阳能电力主要在一天的中间时间段产生，这可以为电力系统创造价值。一部分峰值负载功率可以由分散的并网 PV 系统提供，哪里发出的电能就在哪里消耗掉，减少了输电系统的重负，同时使配电系统和线路受益。

4）国家或国际的政策促进了并网 PV 发电系统的应用。大多数工业化国家都为小规模可再生能源系统提供了不同的鼓励政策。

即使有上述的好处和显著的成本降低，但如果没有公共机构提供合理的资金和促进，在经济方面这些系统仍不能与其他能源资源竞争。对于 PV 系统元件，特别是逆变器，不同的国家之间没有标准化的互联要求，也是制约并网 PV 发电系统市场增长的一个重要屏障。尽管有这些障碍，这个市场在 PV 应用中还是变得越来越重要。虽然与其他能源相比规模较小，但 PV 发电系统还是很可能成为重要的、与公共电网联网的分布式发电系统。

8.2　通用系统

联网 PV 系统，也称为并网 PV 发电系统，可以将太阳能电力直接供给公共电网。这种系统包括：

1）PV 发电装置，一个将太阳能转换为直流电的 PV 阵列。

2）逆变器，也被称为功率调节单元或 PCU，将直流电转换成交流电。

3）平衡系统，包括连线和安装结构。

4）浪涌和接地故障保护设备，计量设备或其他并网可能需要的组件。

5）AC 负载，用电器。

当太阳照射的时候，PV 组件产生的直流电被逆变器转化为交流电。这些交流电能可以供给系统的交流负载，将多余的能量输送到公用电网，或者全部输送给公用电网。没有阳光时，负载需要的能量完全由公用电网提供。在独立 PV 系统中电池所扮演的角色在并网发电系统中由电网来代替，此时电网作为能量的存储系统，降低了成本和维护费用。如果有必要，电池也可以连接在系统中，和有交流输出的独立系统中的连接方法一样。

图 8-1 是一个三相并网 PV 发电系统的原理图。这个原理图在不同的国家由于国家的法规不同，可能会有所不同，特别是涉及安全、保护装置的电路。

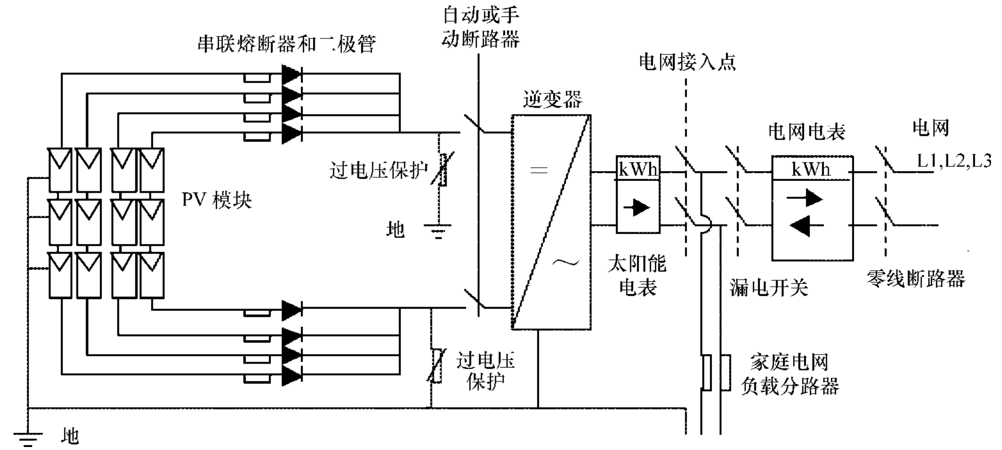


图 8-1　并网 PV 发电系统原理图

从图 8-1 中可以看到，第一个保护措施由 PV 阵列输出与直流母线之间的保险丝和阻塞二极管组成。逆变器的输入和输出都必须装有浪涌保护电路，本图中只在逆变器输入端有这些电路。根据逆变器的类型，作为选件的隔离变压器可以放置在逆变器输出端；有的逆变器内置这样的隔离变压器，有的没有。一些国家强制规定了需要隔离变压器，其中的一个绕组采用三角形连接，用来连接到中、高或超高电

压电网。在大多数的国家，连接到低压电网是不需要隔离变压器的。

如果可能的话，实用安全装置和保护继电器必须放在逆变器输出端和与公用电网的开关点之间，这些没有在图中显示。最后，计量可以在图中显示的位置或者在电网端进行。

并网 PV 系统第一种分类方法是按照功率大小进行分类：

1）小型——功率从 1 ~ 10kWp。典型的应用是：私有房屋、学校建筑、停车场等的屋顶上。

2）中型——功率从 10kWp 到数百 kWp。这类系统可以在被称为 PV 建筑一体化（BIPV）系统的屋顶或外墙看到。与小型系统相比，它们可能工作在更高的电压。

3）大型——功率从 500kWp 到 MWp 范围的集中式系统。这些系统一般由电力公司运营。

8.3 相关技术问题

为了防止 PV 系统损坏，同时也避免降低电网的电能质量，因此保护系统是必要的。其他重要的问题是电气安装程序、公用电网和 PV 系统之间的电气干扰，EMI（电磁干扰）和谐波。在大多数欧盟国家、美国、日本和澳大利亚，广泛的标准和建议已经由不同的国家机构制定，并覆盖了上述大部分问题。

作为这些标准和建议的例子，这里列出两个美国国家标准：

1）ANSI/IEEE 标准 929 - 1988：IEEE 关于住宅 PV 系统和中型功率 PV 系统与电网接口的工业标准。

2）IEEE 标准 929 - 2000：IEEE 关于 PV 系统与电网接口的工业标准。

PV 系统与电网连接的主要的问题的一个简单概述如下。

8.3.1 孤岛保护

一个并网逆变器在公共电网或公共电网的一部分已切除或者不能从公共电网获取电能时，仍然继续运行的模式被称为孤岛模式操作。孤岛会严重地影响连接到电网的设备和负载，并可能导致用户或电网工人被电击。因此，逆变器必须识别电网故障或断网，并且立即切断输出。

过去几年里，已经做了大量预防 PV 发电系统孤岛工作的研究[8.1,8.2]，目前大多数商用逆变器通过不同的控制算法相结合，都具有了可接受的孤岛预防能力。孤岛检测，可以使用主动或被动的方法实现[8.1]。

8.3.2 电压扰动

客户连接到电网的输入端必须保持适当的电压水平。不同的国家已经建立了不同的电压限制。事实上，并网 PV 系统可有助于稳定配电线路电压变化。逆变器必须检测发生在电网连接点的电压变化，多数逆变器还包括自动断开和确认电网稳定

恢复后重新连接的能力。

8.3.3　频率扰动

逆变器通常必须内置超/低电网电压频率断开保护。如果在几个周期内，频率超出预定的范围，通常是电网额定频率，为 ±0.2 ~ ±5Hz，则内部关断动作。

8.3.4　断路

PV 并网发电系统中，通常包含如图 8-1 所示的开关，用来断开或分离电网连接。这个开关，特别对于维护人员或电网工人来说，是一个安全保障。考虑到上述的保护是逆变器必须具备的，特别是对于孤岛检测和预防而言，这个断路开关可以看做是多余的，然而，人身安全是并网 PV 系统最重要的问题[8.3]，并且还必须满足不同国家、地区的地方法规。

8.3.5　并网失败后的重连

逆变器重连之前，必须保证电网已经正常运行了一段安全时间。大多数商用逆变器中，通过电网检测和自动重连完成这个任务。大多数逆变器能在观察到一定电网周期的电压、幅值和频率正常后，自动重连到电网。

8.3.6　注入电网的直流分量

正如已经说过的，一些逆变器内部包含变压器，抑制任何直流分量注入到电网中。排除直流分量输入电网的好处是提高人身安全水平，预防公用电网扰动和当地配电变压器饱和，以及进一步预防感性负载饱和。

然而在目前市场上，由于技术和成本的优势，没有隔离变压器的逆变器越来越多。在大多数国家，小型 PV 并网系统并不要求需要隔离变压器，但中型或大型 PV 发电系统通常必须有隔离变压器。

8.3.7　接地

PV 系统组件，包括逆变器，必须按照不同国家法规规定的方式接地。当接地故障发生时，必须通过接地线传导电流，以减少触电，火灾和损坏负荷和系统设备的危险。

8.3.8　EMI

PV 系统组件，特别是逆变器，都需要满足不同程度的高频噪音辐射/抗扰性要求，上述要求限制了允许的辐射干扰频谱，其频率范围通常为 150kHz ~ 30MHz。

8.3.9　功率因数

功率因数是评价电网的一个重要指标，无论是在公用电网的连接点，还是在逆变器的输出端。该规定同样取决于国家，但一般来说，当逆变器输出超过其额定值的 10% 时，最低要求为功率因数大于 0.85。

一些最重要的逆变器参数，如输入电压范围，额定和最大输出功率，总谐波失真（THD）和逆变器的效率在第 6 章已经定义了。一些全球性的制造商生产了多种多样具有不同容量和性能的逆变器。表 8-1 列出了一些 PV 系统使用的逆变器，并列出了一些关心的特性。表 8-1 还列出了这些制造商的网站，以便查找这些逆变

器的详细信息。

表 8-1 商用逆变器指标

逆变器	制造商	标称输出功率（VA）	THD（%）	输出频率（Hz）	输出电压（VAC）	最大效率（%）
Tauro	Atersa www. atersa. com	700 ~ 3000	<4	50 ±5%	220 ±7%	93
MM 5000/3000	Advanced Energy Inc. http：//www. advancedenergy. com	5000	<3	60 ±5%	120 ±5%	92
Fronius IG	Fronius http：//www. fronius. com/	1300 ~ 4600	<3. 5	50	230	94. 5
T series	Futronics http：//www. futronics. co. uk/	1200 ~ 1500	<3	50/60 ± 0. 02%	230 ±3%	90
Sunmaster QS series	Mastervolt http：//www. mastervoltsolar. com/	1500 ~ 5000	<3	50	230	94
Sunny Boy series	SMA http：//www. sma. de/	700 ~ 2600	<4	50	180 ~ 265	93. 6
Prosine series	Xantrex http：//www. xantrex. com/	1000 ~ 1800	<3	50/60 ± 0. 05%	120/230 ± 3%	90

8. 4 并网 PV 系统逆变器的 PSpice 模型

第 6 章中讲述了两个逆变器的 PSpice 仿真模型。一个逆变器行为模型和在其基础上开发出的逆变器输入直接连接到电池的第二个逆变器模型。上述逆变器被建模为受控电压源。而并网 PV 系统用的商用逆变器更适于用受控电流源建模。此外作为并网逆变器，独立逆变器模型的一些功能这里可以忽略，特别是模型中的功率控制器（控制输入负载的功率需求和电池的 SOC）等必须加以改变。

本章为 PV 并网发电系统提出了一个新的逆变器模型。下列网表文件给出了这种逆变器的 PSpice 模型，该模型实现了图 8-2 所示的连接。图 8-3 显示了该逆变器模型的等效电路原理图。

```
***** inverter7.cir / Inverter model for grid connected pv systems
.subckt inv 1 3 4 5 6 Params: nf=1
empp 1 3 value={v(6)-0.8}
r6 6 3 1000
r5 5 3 1
v2 9 3 sin(0 1 50Hz)
eVc2 7 3 value={(v(6)*v(5)*nf*1.41)/220}
giout 3 4 value={v(7)*v(9)}
.ends inv
```

PV 逆变器通常具有最大功率点跟踪能力，以从 PV 阵列获得最大的功率。图

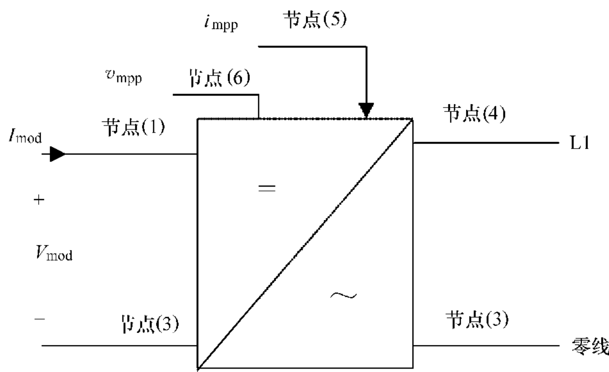


图 8-2　逆变器模型原理图

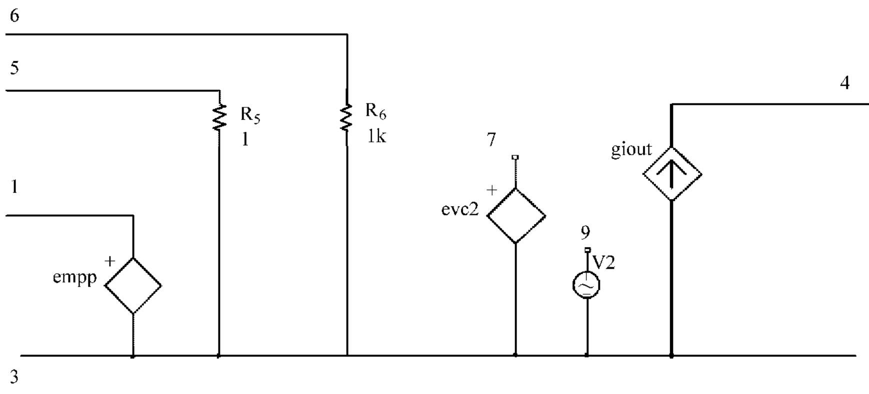


图 8-3　逆变器模型的等效电路原理图

8-2 和图 8-3 所示的模型具有此能力。为了使逆变器模型尽可能简单，没有限制最大功率点跟踪范围和最低逆变器输入直流电压。但是商用逆变器要在给定的直流输入电压范围实现 MPP 跟踪功能，还要求直流输入电压值，也必须高于保证逆变器正常工作所需的最低值，如第 6 章所述。本章后面还将描述一个考虑到这些影响的更实际的模型。图 8-2 和图 8-3 所示的简化模型可以用来描述所涉及的一些概念。

在上述网表中可以看出，逆变器有两个输入，即 PV 发电装置最大功率点的坐标值，见图 8-2 和图 8-3 中的节点 5 和节点 6。在这些逆变器输入端接有网表中所述 R_5 和 R_6 两个电阻。PV 发电装置在节点 1 的逆变器输入信号控制下，强制工作在最大功率 MPP 点。上述功能通过接入一个复制了给定时刻辐射和温度条件下 MPP 电压值的受控电压源 empp 实现。考虑到 PV 发电装置的输出和逆变器的输入之间可能存在的阻断二极管的压降，引入一个 0. 8V 的修正值。

受控电压源 eVc2 根据逆变器的效率，*nf*，逆变器输入直流功率和输出电压幅值（此种情况下，采用交流 rms 电压值 220V），计算所需的正弦输出电流的幅值。该幅值在受控电流源 giout 与电压源 V2 提供的一个幅值为 1V，频率为 50Hz 的正弦

信号相乘。最后 giout 电流源输出的交流电流施加于逆变器输出端，节点 4，如图 8-3 所示。

例 8.1 说明了上述 PV 并网发电系统模型的使用。

例 8.1 对图 8-4 中的 PV 系统进行仿真，其中：

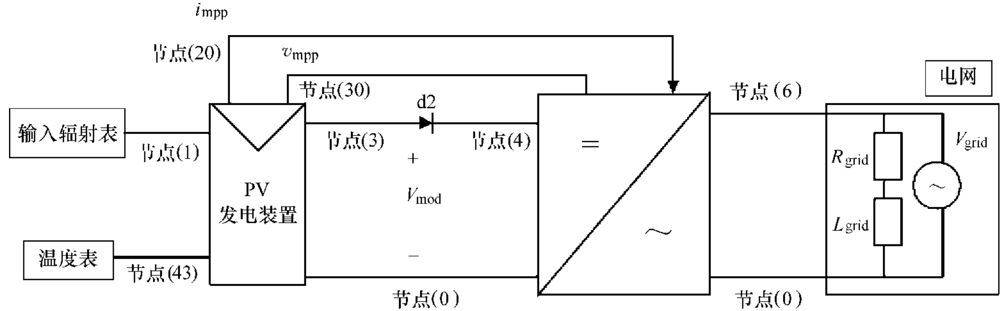


图 8-4 例 8.1 的原理框图，无接地通路

1）PV 发电装置由 2×3 个 PV 模块组成，每个模块由 36 个太阳电池串联组成。模块的峰值功率为 85W，MPP 的坐标是：$i_{mmr}=4.9$A 和 $V_{mmr}=17.3$V，开路电压 $v_{ocmr}=21.2$V。

2）假定辐照条件如文件 “aprilmicro.stl” 所示，其曲线如图 8-5 所示，温度恒定为 12℃，辐照时间单位由实际测得的数据乘以系数 1e-6 获得，x 轴末端坐标为 140ms，等效于实际的 40h。

3）假设逆变器效率固定，$nf=1$。

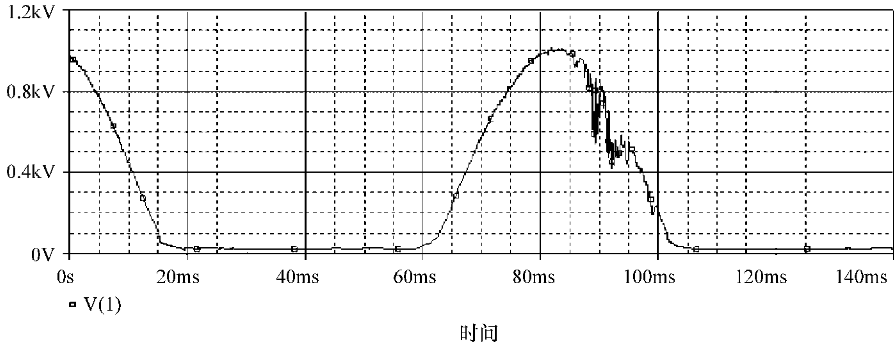


图 8-5 例 8.1 的辐射图

4）假设电网可以用一个理想的正弦波电压源来模拟，电压有效值为 220V，频率为 50Hz，和一个由电阻和电感组成的负载并联：电感 $L_{grid}=0.5$mH，电阻 $R_{grid}=14.4\Omega$。

编写相应的网表文件并对 PV 发电系统两天的演变进行仿真。

上述 PV 发电系统的仿真网表为附件 H 中的 “Example 8.1.cir”，其中 PV 发电装置已由第 4 章中所述的 generator_beh.lib 实现。模型有一个小的改变，即去掉了

网表 generator _ beh. lib 中的 rigm 电阻，因为这个电阻已经包含在逆变器的模型中。为了取得 MMP 的电流值，该电阻对于将逆变器输入节点 5 的电压值转换为电流值是必要的。

本节使用 inverter7. cir 作为逆变器模型，电网由子电路“grid. cir”实现。首先看逆变器输入端，直流电压和电流在此输入。比较逆变器的输入电流 *I*（d2）和 PV 发电装置的 MPP 输出电流 I（xinvert. r5），如图 8-6 所示，两个波形只有微小的差异，可以验证逆变器实现了最大功率点跟踪。

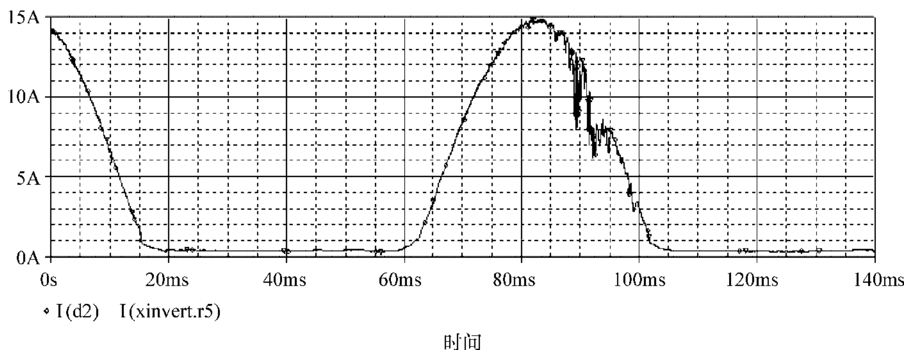


图 8-6　逆变器的输入电流 *I*（d2）和 PV 发电装置的 MPP 输出电流 *I*（xinvert. r5）的比较

逆变器输入电压的 MPP 跟踪效果可以在图 8-7 中看到，图中给出了逆变器的输入电压 V（xinvert. empp）和 PV 发电装置的 MPP 电压 V1（xinvert. r6）的电压波形。两个电压之差为 0. 8V，是相应的阻断二极管的压降。

如果观察其输出交流信号，要注意图 8-6 和图 8-7 中辐射图的 PSpice 内部时间单位，不同于显示 50Hz 的交流信号所需的时间单位。协调两个时间单位的两个可能的方式是：①辐照数据使用实际时间单位；②用与时间单位同样的变换系数变换交流信号的频率。两种解决方案在 PSpice 环境下采用都不现实，因为它们需要很长的仿真时间。

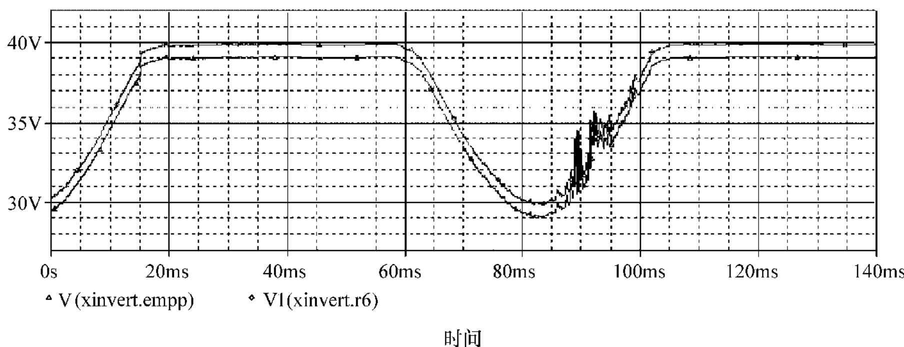


图 8-7　逆变器的输入电压的 MPPT 效果

相反，观察交流输出信号的时间变化的好方法，是取一些离散的辐照值，并对几个相应周期的交流信号进行观察。替换上述语句只需要对 PSpice 文件进行少量修改：

```
.inc april stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
```

为

```
.param irrad=1000
vmesur 1 0 dc {irrad}
```

并且将瞬态分析时间减少到 1s，这将允许观察 50 个周期的输出信号。

第二种可能性是引入以 s 为时间单位的辐射数据，并对不同的辐射水平进行短时间仿真。这样不用进行长时间的仿真就可以对变换器的输出特性进行观察。

按照上述思路，进行了一个新的仿真，瞬态分析时间为 1.3s，对应从 10 ~ 1000W/m^2 四个不同的辐射水平。图 8-8 显示了这个新的仿真的辐射曲线，它替代以前的辐照文件，并作为网表文件中的一个激励源文件。

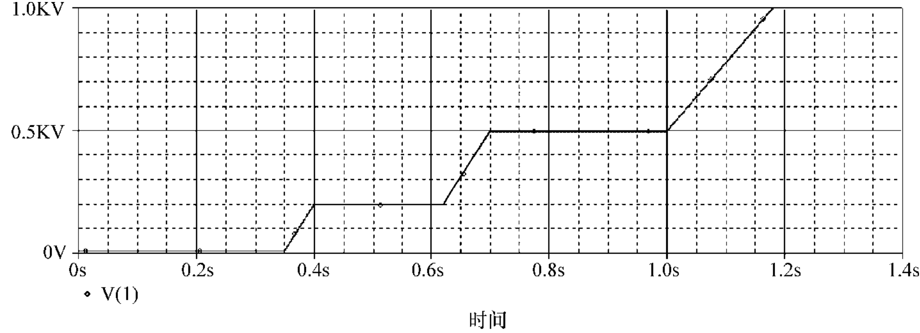


图 8-8　辐射数据

为了减少仿真时间，对网表文件中的瞬态仿真参数进行了第二次修改：

```
.tran 2ms 1.3s 0 90u
```

图 8-9 显示了逆变器输出电流的结果 I（xinvert. giout）和 AC 逆变器的输出功率（V（6）* I（xinvert. giout）/2）。辐射值对正弦输出电流的幅值的影响，以及逆变器最大输出功率的趋势和预期相同。由于 PV 发电装置在 1000W/m^2 辐照度值具有 510W 峰值功率，考虑逆变器效率为 90%，AC 逆变器的输出功率大约为 400W。发电装置模型中的温度效应也说明输出功率应低于最大可用值，仿真在一个恒定的环境温度 12℃ 条件下运行。

最后图 8-10 显示了逆变器与电网连接点的电压。时间轴单位已经转换，以适合对 50Hz 的频率信号进行观察。

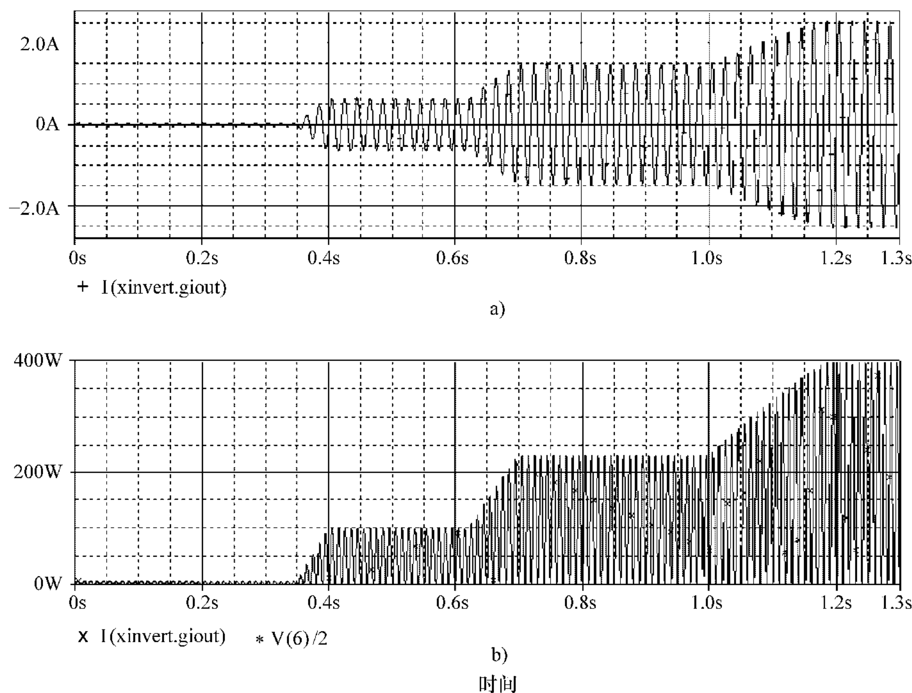


图 8-9 a）逆变器并网点电流；b）输出功率

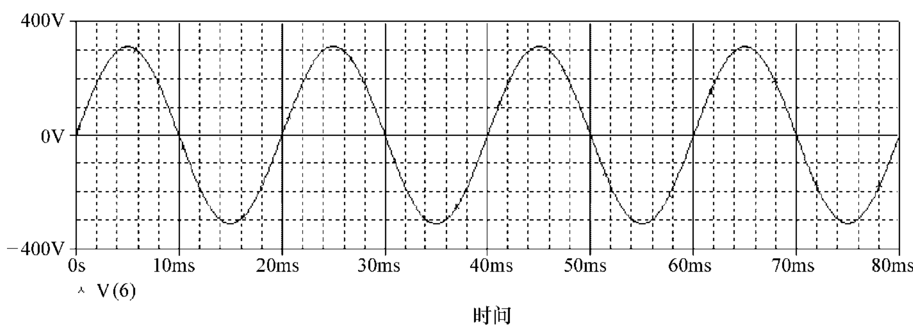


图 8-10 逆变器并网点电压，即输出电压

8.5 交流模块 PSpice 模型

一些制造商为并网设备制造的商用 AC – PV 模块，由一个标准的 PV 组件和一个内置的小型 DC – AC 逆变器组成。有时不止一个 PV 组件连接到小型逆变器，并且在这种情况下，PV – AC 发电装置这个名称可以用来替代 PV – AC 模块。

AC 模块已成为迅速发展的并网 PV 系统市场上的一个可用选件[8.4]。使用 AC 模块的主要优点是没有直流电路和传统并网 PV 系统的一些其他组件，降低了系统

的功率损耗和复杂性。其一个主要缺点是，每个逆变器模块必须包含必需的电子控制，如 MPPT，而且还必须满足安全标准[8.5]，可能造成成本增加。

使用上一节中所述的逆变器模型和前面章节中提出的 PV 发电装置模型 generator _ beh. lib，可以方便地组合成交流发电装置的模型。这样写出的交流发电装置模型的网表如下，其中仅给出对子电路 generator _ beh. lib 的修改部分。

```
***** ACGENERATOR_BEH.LIB
. subckt acgenerator_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 419 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1, vmmr=1, tr=1, ns=1, nsg=1 npg=1, nf=1

empp 404 400 value={v(409)}
vc1 9 400 sin(0 1 50Hz)
eVc2 7 400 value={(v(409)*v(408)*nf*1.4142)/220}
giout 400 419 value={v(7)*v(9)}
.ends acgenerator_beh
```

交流发电装置模型基本上是由 PV 发电装置直接连接到逆变器组成。generator _ beh. lib 中增加了一个新的节点，节点（419），它是内置逆变器产生的交流电流的输出点。交流发电装置同上一节介绍的逆变器模型一样包括 MPPT 功能。

例 8.2 模拟一个并网 AC 模块，其中：

1）PV 组件由 36 个太阳电池串联组成。模块的峰值功率为 85W，MPP 的坐标是：i_{mmr} = 4.9A 和 V_{mmr} = 17.3V，开路电压 v_{ocmr} = 21.2V。

2）AC 模块包括上述 PV 模块和一个效率 100% 的小型逆变器。

编写相应的网表，获得辐射值为 400W/m^2 和 1000W/m^2 时的 AC 模块输出电流。假设环境温度为 16℃。包含辐射曲线文件 irrad2E. stl 的网表如下：

```
******* Example 8.2 Acgenerator
*ACgen.cir
.inc irrad2E.stl
.include acgenerator_beh.lib
xacgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 50 acgenerator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.9, vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=1 npg=1, nf=1

vm 1 0 stimulus virrad
Vtemp 43 0 dc 16
.inc grid.cir
xgr1 50 0 grid
.tran 0.002s 1s
.probe
.end
```

图 8-11 为上述网表的原理图。

图 8-12a 为辐射度，图 8-12b 为 AC 模块的输出电流。

两个设定辐射水平的最大交流输出功率可以从逆变器输出的幅值求得：

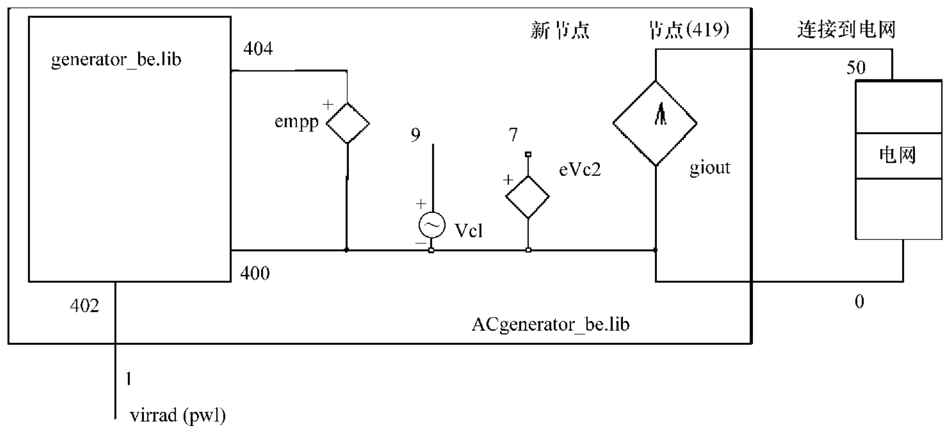


图 8-11　例 8.2 的原理图

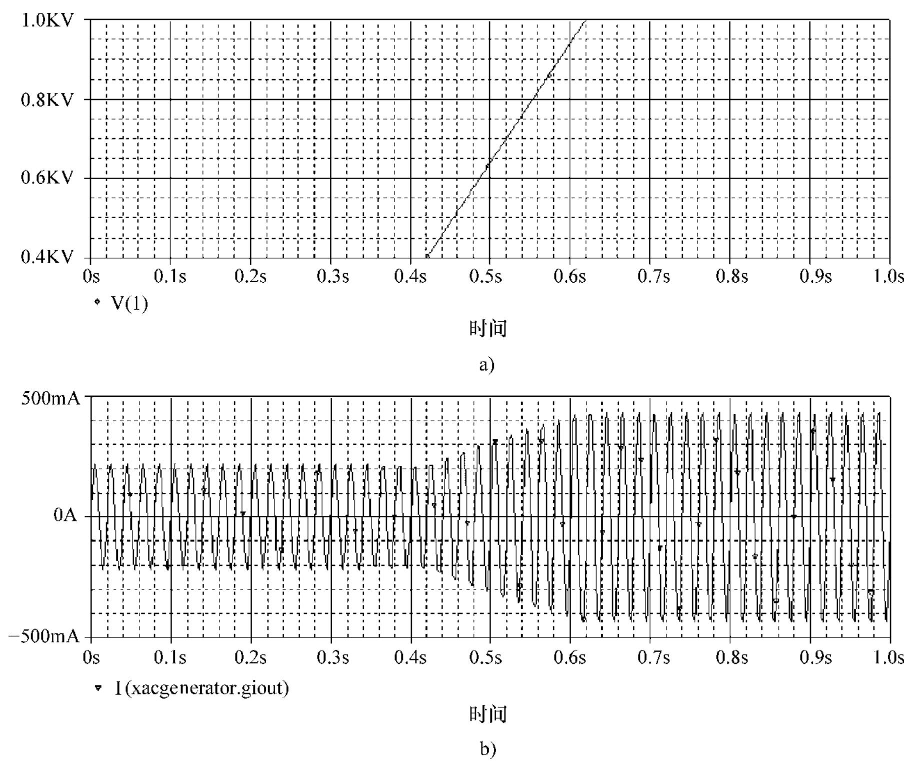


图 8-12　a）辐射度；b）AC 模块输出电流

$$\text{Power} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} = \frac{1}{2} V_{\text{peak}} I_{\text{peak}}$$

在这个例子中，辐射度在 400W/m^2 和 1000W/m^2 时发出的功率分别为 34.34W 和 63.9W，如图 8-13 所示。

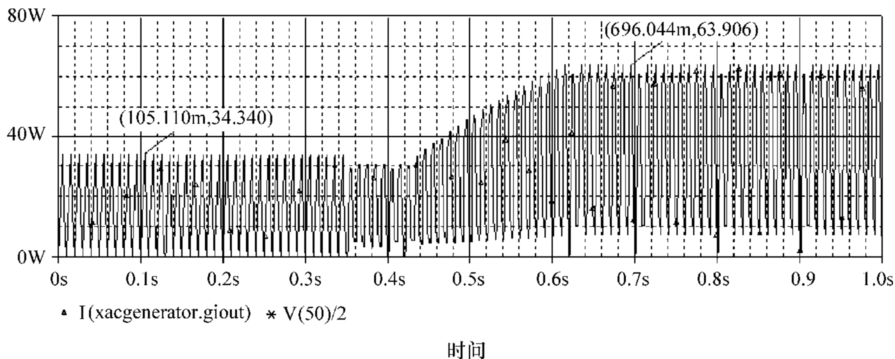


图 8-13 AC 模块输出功率

8.6 并网 PV 系统的估算和能量平衡

设计一个并网 PV 系统必须考虑以下几个因素：PV 发电装置的容量、逆变器的容量、系统布线、接地、浪涌保护、防孤岛、电网和逆变器输出之间的连接点等。这些因素也可以根据系统的容量：小型、中型或大型而变化。此外，因为此类系统不仅涉及电能标准，如果由太阳能 PV 发电系统产生的电力有经济资助，则补贴的数额和限制系统规模的监管问题还会影响并网系统的最终规模。

在本书中电气建模是主要的关注点，尽管不同的设计方案差别很大，但使用的最合乎逻辑的设计标准是基于能源方面考虑的。

7.3 节介绍了 PV 系统的能量平衡。其估算过程也可应用于并网 PV 系统。

事实上我们关注的是基于平均峰值太阳时（$\overline{\text{PSH}}$）的平均设计。

使用 E_{DC} 替代负载消耗的能量 L，式（7-8）可重写为：

$$N_{sG}V_{mMr}N_{pG}I_{mMr}\ (\overline{\text{PSH}})\ \cdot D - E_{DC} \tag{8-1}$$

这里 V_{mMr} 和 I_{MMR} 是标准条件下一个 PV 模块的最大功率点电压和电流的坐标，N_{sG} 是形成 PV 发电装置的模块的串联数，N_{pG} 是模块的并联数，E_{DC} 是峰值太阳时的平均值等于 $\overline{\text{PSH}}$ 的 D 天里 PV 发电装置产生的总直流输出能量。

PV 发电系统的峰值功率 P_{DCpeak} 可写为：

$$N_{sG}V_{mMr}N_{pG}I_{mMr} - P_{DCpeak} \tag{8-2}$$

知道了 PV 系统将安装地区的 $\overline{\text{PSH}}$ 值，和一个特定的时间段（月，年等）内需要注入到电网能量，PV 发电装置的容量就可以确定了。

第一步是依据逆变器的特性，尤其是它的额定输出功率 P_{nom} 选择合适的逆变器或逆变器的大小。PV 发电装置在在标准 AM1.5G 频谱 1kW/m^2 辐照的条件下，逆变器输出的 AC 功率被称为 P_{ACpeak}，该值必须小于逆变器的额定功率 P_{nom}。

如第 6 章中所提到的，P_{Acpeak} 的值还取决于逆变器的效率 η：

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{ACpeak}}}{P_{\mathrm{DCpeak}}} \tag{8-3}$$

根据式（8-3），式（8-2）可以改写为：

$$N_{\mathrm{sG}} V_{\mathrm{mMr}} N_{\mathrm{pG}} I_{\mathrm{mMr}} = \frac{P_{\mathrm{ACpeak}}}{\eta} \tag{8-4}$$

根据选定变频器的输入要求，特别是最大输入电流 $I_{\max}$，PV 组件的并联数量 N_{pG} 可以计算如下：

$$N_{\mathrm{pG}} = \frac{I_{\max}}{I_{\mathrm{mMr}}} \tag{8-5}$$

最后，可以将式（8-4）改写为式（8-6），得到 PV 模块的串联数，并使用式（8-7），得到 PV 发电装置需要的 PV 组件总面积：

$$N_{\mathrm{sG}} = \frac{P_{\mathrm{ACpeak}}}{\eta V_{\mathrm{mMr}} N_{\mathrm{pG}} I_{\mathrm{mMr}}} \tag{8-6}$$

$$A = N_{\mathrm{pG}} N_{\mathrm{sG}} A_{\mathrm{m}} \tag{8-7}$$

这里 A_{m} 是一个 PV 模块的面积，A 是所需的 PV 组件的总面积。

还必须注意 PV 组件产生的一部分 P_{DC} 不会被逆变器转换，因为当逆变器的输入功率低于设定的最低值时，逆变器的输出是开路的。

如果考虑到系统的能量特性，对系统 AC 输出能量均方根值的长时间仿真计算，就可以使用很少的 CPU 时间来实现。这种思路已经在相当复杂的逆变器模型[8.6]上成功实施，并可以据此在这里适时建立一个新的逆变器 PSpice 模型。网表如下：

```
************ Inverter 9.cir
.subckt inv 1 3 4 5 6 Params: nf=1, Vmin=1
empp 1 3 value={v(6)-0.8}
r6 6 3 1000
r5 5 3 1
giout 3 4 value={(v(88)*v(5)*nf)/220}
ef 88 3 value=IF {(v(6)>Vmin, V(6), v(3))}
.ends inv
```

这个模型的原理框图和图 8-2 所示的“inverter7. cir”是相同的，两个逆变器模型具有相同的 I/O 节点。两个逆变器模型的 MPPT 的策略也是相同的，只是引入了两个小的变化：

1）逆变器输入电压的最小值。给模型中引入一个新的输入参数 $V_{\min}$。当输入电压低于 $V_{\min}$ 时逆变器输出电流将被强制为零，而输入电压比 $V_{\min}$ 高时，逆变器正常工作。这种控制通过压控源 ef 和上述网表的 IF 语句实现：

ef 88 3 value – {IF（v（6） >Vmin，V（6），v（3））}

2）直流输出电流等效 rms 值。像先前的模型“inverter7. cir”中一样，逆变器的输出为一个受控电流源，但现在的输出是直流电流。考虑逆变器的效率 *nf*、逆变

器的输入直流功率和输出电压 rms 值，控制电流源 giout 输出的直流电流值等于 AC 逆变器输出的 rms 电流值。计算输出电流的 rms 值时，和前面章节一样，电网电压 rms 值 220V 已经考虑在内。这种计算已表现在上述网表的控制电流源 giout 中：

giout 3 4 value – {(v(88) * v(5) * nf)/220}

为了说明这种逆变器模型的特性，分析下面一个小型并网 PV 发电系统的仿真网表。

```
******* Grid connected PV system using inverter9.cir
*GCPV1.cir
.include generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr 5.2, coef_iscm 0.13e-3, vocmr 21.2, coef_vocm -0.1,pmaxmr 85,
+ noct-47,immr-4.9, vmmr-17.3, tr-25, ns-36, nsg-4 npg-6

.inc madrid1.stl
vmesur 1 0 stimulus vmadrid_hour
.inc MadridT1.stl
vtemp 43 0 stimulus vtemp_madrid
dblock 3 4 diode
.model diode d(n 1)
.inc inverter9.cir
xinvert 4 0 16 20 30 inv params: nf=0.9,Vmin=67
Rm 16 0 1
eE 7 0 value={(sdt(1e6*220*v(16)))}
.tran 0.1us 24u
.probe
.end
```

图 8-14 是上述网表的原理框图。可以看出，PV 发电装置由 24 个 PV 模块组成，$N_{sG}=4$，$N_{pG}=6$，每一个模块都有 85W 的峰值功率，组成了一个峰值 2kW 的系统。一个阻断二极管 dblock 被放置在 PV 组件和逆变器的输入之间。

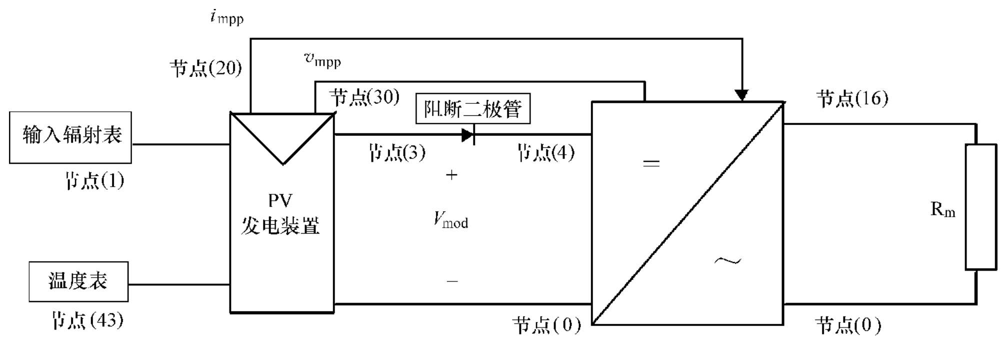


图 8-14　仿真的 PV 系统原理框图

逆变器的效率为 90%，正常工作的最低输入电压为 67V。

辐射值和温度曲线分别存于“Madrid1. stl”和“MadridT1. stl”文件中，为提高仿真速度，内部的 PSpice 时间单位为 μs。为了模拟完整的一天，实际时间的 1h 等效为内部时间的 1μs。文件如下：

*** Madrid1.stl .stimulus vmadrid_hour pwl	***** MADRIDT1.stl .stimulus vtemp_madrid pwl
+1u 0	+ 1u 4.7
+2u 0	+ 2u 4.8
+3u 0	+ 3u 4.4
+4u 0	+ 4u 4.3
+5u 0	+ 5u 4.2
+6u 0	+ 6u 4.4
+7u 0	+ 7u 4.1
+8u 0	+ 8u 3.8
+9u 10	+ 9u 4.1
+10u 193	+ 10u 5.2
+11u 218	+ 11u 5.7
+12u 520	+ 12u 7.4
+13u 729	+ 13u 9
+14u 511	+ 14u 10.2
+15u 587	+ 15u 11.4
+16u 299	+ 16u 12.1
+17u 132	+ 17u 11.9
+18u 2	+ 18u 11.1
+19u 0	+ 19u 9.6
+20u 0	+ 20u 8.8
+21u 0	+ 21u 8.1
+22u 0	+ 22u 7.3
+23u 0	+ 23u 6.1
+24u 0	+ 24u 6.5

图 8-15 和图 8-16 显示了上述的辐射和温度曲线。

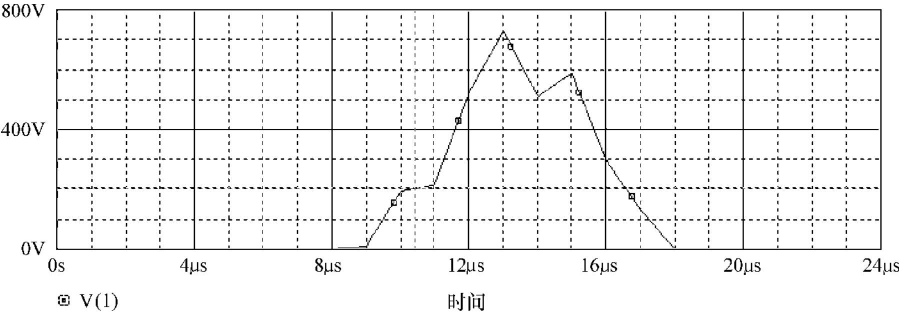


图 8-15　Madrid1. stl 文件的辐射度曲线

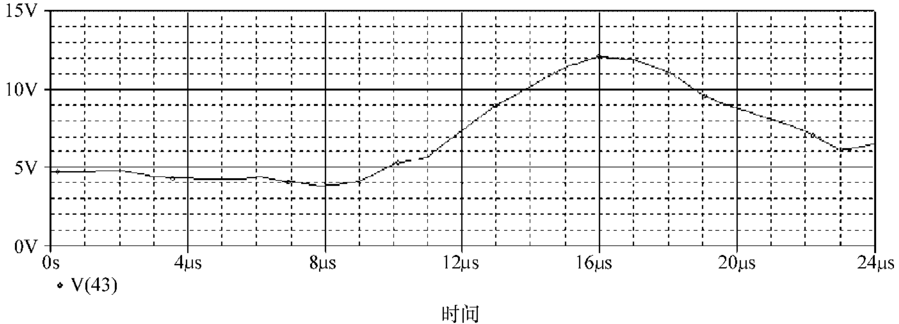


图 8-16　Madrid1. stl 文件的温度曲线

一个简单的电阻 R_m 放置在逆变器输出端以模拟负载。图 8-17 为逆变器输出 rms 电流 V（16）和逆变器的直流输入电压 V（4）。可以看出，当逆变器输入电压低于最低设定输入电压 67V 时，逆变器输出电流变为零。

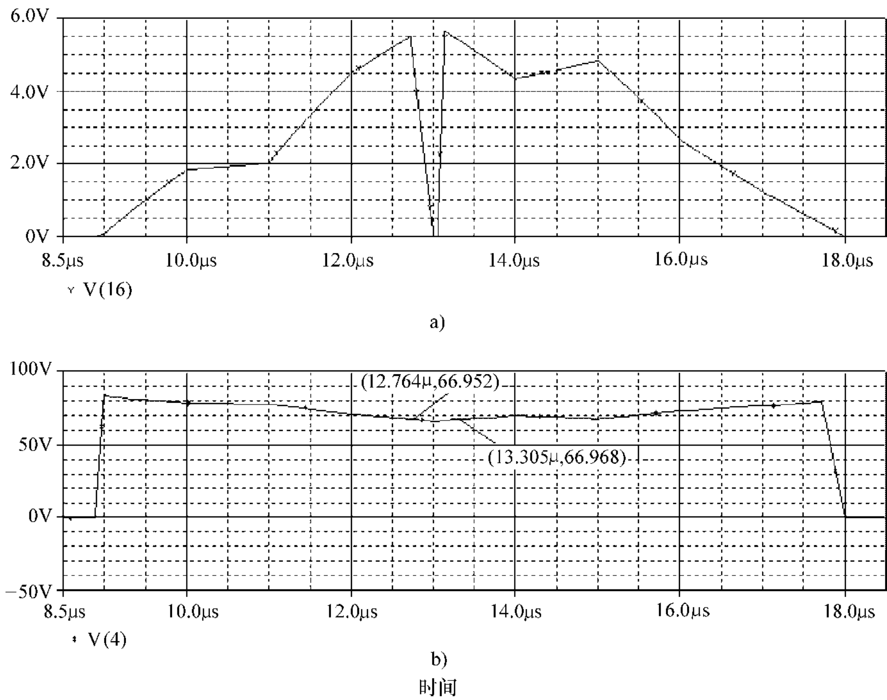


图 8-17　a）逆变器直流输出电流 V（16）（单位 V 代表 A）；b）直流输入电压 V（4）

最后，图 8-18 为仿真的一天里 PV 系统产生能源的 rms 值图，单位为 Wh。在这种情况下为 5719.4Wh/天。为了计算发电量，引入一个控制电压源至标准 PSpice 函数的“eE”文件中。这个电压源根据电网电压交流 rms 值 220V 来计算总的交流发电量。引入一个 1×10^6 的比例因数至方程以修正时间单位。“eE”受控电压源在网表中定义如下：

```
eE 7 0 value={(sdt(1e6*220*v(16)))}
```

例 8.3 给出了一个中等容量的并网 PV 发电系统的结构，和使用本章介绍的逆变器模型进行了一年时间仿真的结果。

例 8.3　设计并仿真一个位于西班牙马德里的中等容量的商用屋顶并网 PV 系统。该系统的原理图如图 8-19 所示，其中三个单相逆变器连接到三个 PV 发电装置，形成一个三相并网 PV 发电系统。在这种情况下：

1）每个 PV 发电装置由 85Wpic 的模块组成，最大功率点坐标是：$I_{mmr}=4.9\text{A}$，$V_{mmr}=17.3\text{V}$，模块面积为 0.64m^2。

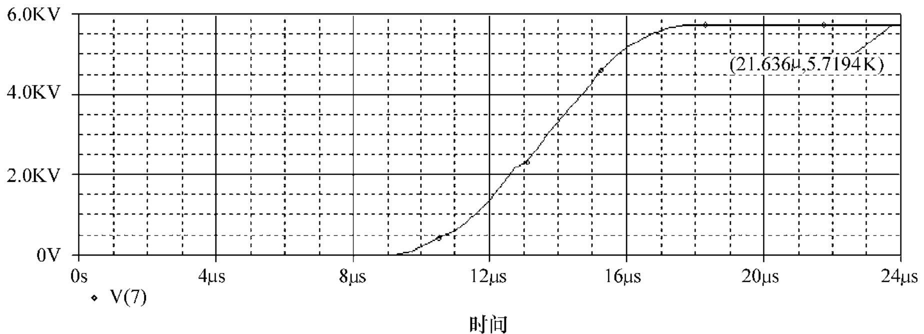


图 8-18　发电量 V（7），单位 Wh/天

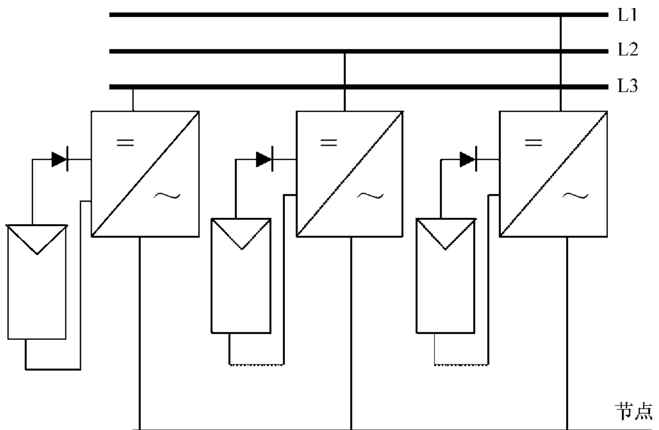


图 8-19　例 8.3 的 PV 系统原理框图

2）逆变器的参数是：$nf = 0.91$，$V_{\min} = 1\text{V}$，交流输出电压为 220Vrms。

因为马德里的$\overline{\text{PSH}} = 4.5\text{h}/$天，运行一年注入电网的总能量为 18MW，据此设计逆变器和 PV 发电装置的容量。最后估计 PV 组件所需的总面积。

因为系统的对称性，这个研究可以局限到一个逆变器连接到一个 PV 发电装置，换句话说，只用考虑三相输出中的一相。单相注入电网的能量将是总能量的三分之一：6MWh/年。利用式（8-3）和式（8-1），可以估算出所需逆变器的额定功率：

$$P_{\text{nom}} > P_{\text{ACpeak}} = \eta \frac{E_{\text{AC}}}{D \cdot \overline{\text{PSH}}} = \frac{6 \times 10^6 \text{Wh}}{365\text{d}4.5\text{h}} = 3324.2\text{W} \tag{8-8}$$

选择一个峰值功率为 4kW 的逆变器。使用式（8-5），每个 PV 发电装置的并联模块数量可以计算如下：

$$N_{\text{pG}} = \frac{I_{\max}}{I_{\text{mMr}}} = \frac{115\text{A}}{5.2\text{A}} = 22.11$$

选择 $N_{\text{pG}} = 22$。

式（8-6）可以计算 PV 组件的串联数：

$$N_{sG} = \frac{P_{ACpeak}}{\eta V_{mMr} N_{pG} I_{mMr}} = \frac{4kW}{0.91 \times 17.3V \times 22\ 5.2A} = 2.22$$

我们选择 $N_{sG} = 2$。

需要的 PV 发电装置的总屋顶面积将是：

$$A = 3 \times N_{sG} \times N_{pG} \times A_m = 84.48m^2$$

使用“irradmadrid. stl”和“TempM. stl”文件中的辐射和温度条件，进行一年的仿真，文件中的数据已经转化为以 μs 为时间单位，1μs 代表实际的 1h。这些辐射和温度的文件就是第 7 章中使用过的。

相应的仿真网表如下：

```
******* Example 8.3. cir
.include generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.9, vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=2 npg=22
.inc irradmadrid.stl
vmesur 1 0 stimulus vmadrid_hour
.inc TempM.stl
vtemp 43 0 stimulus vtemp_Madrid
d2 3 4 diode
.model diode d(n=1)
.inc inverter9.cir
xinvert 4 0 16 20 30 inv params: nf=0.91,Vmin=1
Rm 16 0 1
eE 7 0 value={(sdt(1e6*220*v(16)))}
.tran 0.51us 8760u
.probe
.end
```

可以看到因为系统的对称性，仿真也被局限到一个逆变器连接到一个 PV 发电装置，换句话说，只是对三相输出中的一相进行了模拟。

图 8-20 显示了一年的总发电量曲线，注意，总发电量是单相发电量的三倍。

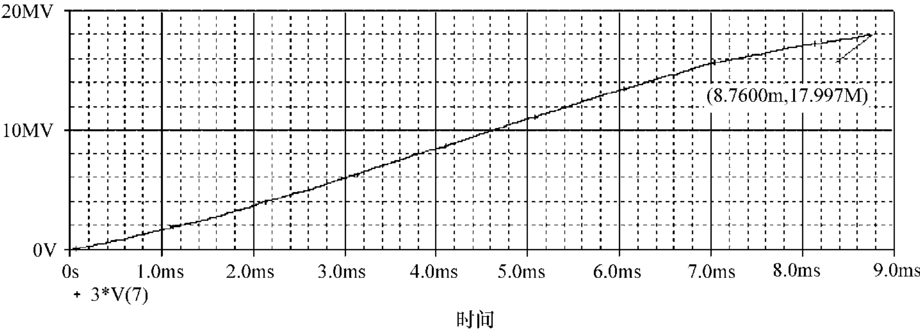


图 8-20　总发电量（单位 MWh）

在图 8-20 中可以看到：PV 系统在一年中产生的总发电量为 17.997MW。

最后，图 8-21 显示了相应的一月份的详细仿真结果。给出了这一个月注入 L1 的电流（rms A）和发电量（kWh）的曲线。

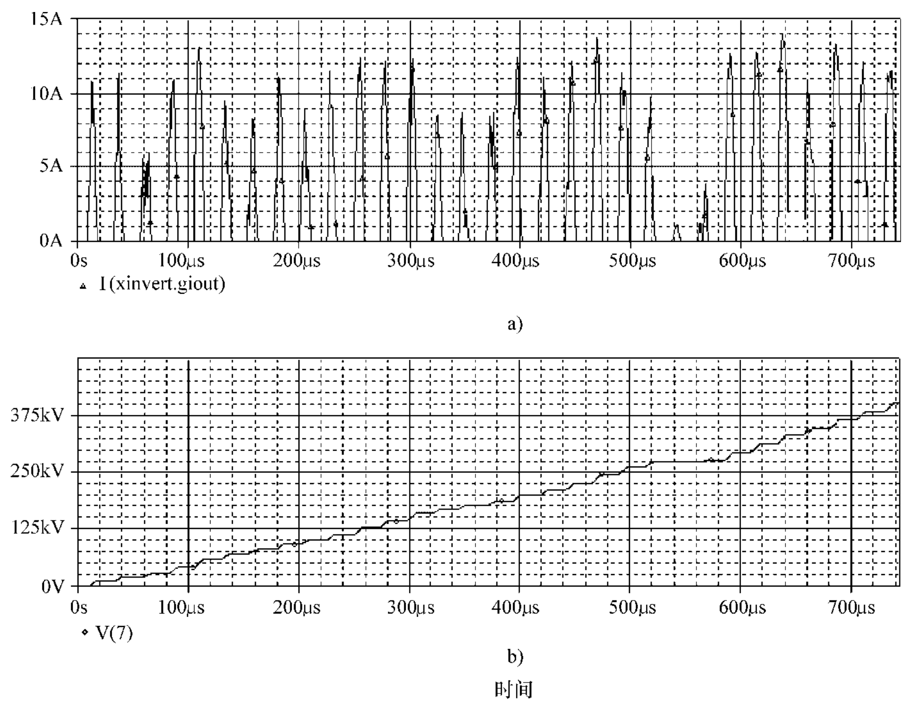


图 8-21　a）L1 逆变器输出电流（A rms）；b）L1 发电量（kWh）

当交流负载存在时，本节介绍的逆变器模型也可用于小型并网 PV 系统，如小型住宅设施。例 8.4 表明可以用非常简单的方法并且无需花费很长的仿真时间就可以实现这种仿真，获得有关 PV 系统的估算和能量平衡的重要信息。

例 8.4　设计并仿真一个位于西班牙马德里的小型家庭屋顶用并网 PV 系统。系统原理图如图 8-22 所示，其中一个单相逆变器连接到 PV 发电装置。最后，系统交流负载的建模，如图 8-22 所示，采用了一个包含日负荷配置需求曲线的以 AC rms 电流表示的电流源。

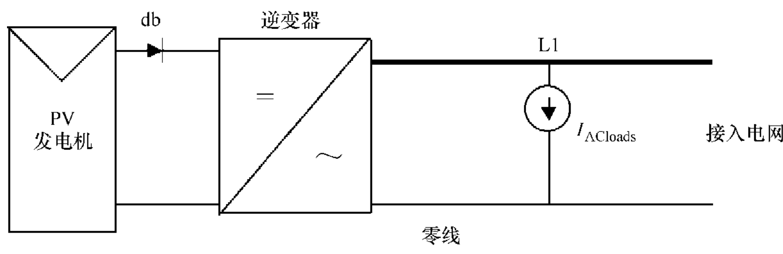


图 8-22　例 8.4PV 系统的原理框图

系统的详细描述如下：

1）PV 发电装置：由 85Wpeak 的模块组成，最大功率点坐标是：$I_{mmr}=4.9A$，$V_{mmr}=17.3V$，模块面积为 $0.7m^2$。

2）逆变器：效率 $nf=0.85$，最小输入直流电压为 40V，最大输入电流为 15A，线 1 处电压有效值为 220V。

3）温度和辐射曲线：由文件“MadridT2. stl”和“Madrid2. stl”给出，这些文件对应两天的数据，时间单位为 μs，1μs 代表实际 1h，如图 8-23 所示。

4）负载需要的 AC rms 电流在文件“Madrid _ load. stl”中给出，文件中包括一个典型的住宅区域在日消耗为平均 6kWh/天条件下两天的数据。该负荷电流曲线显示在图 8-24 中。

5）PV 发电装置和逆变器的输入之间接有一个阻断二极管。

马德里一月份的 $\overline{PSH}=2.8h/天$，运行 2 天后并网 PV 系统和负载消耗的总能量为 700Wh，据此设计逆变器和 PV 发电装置的容量。

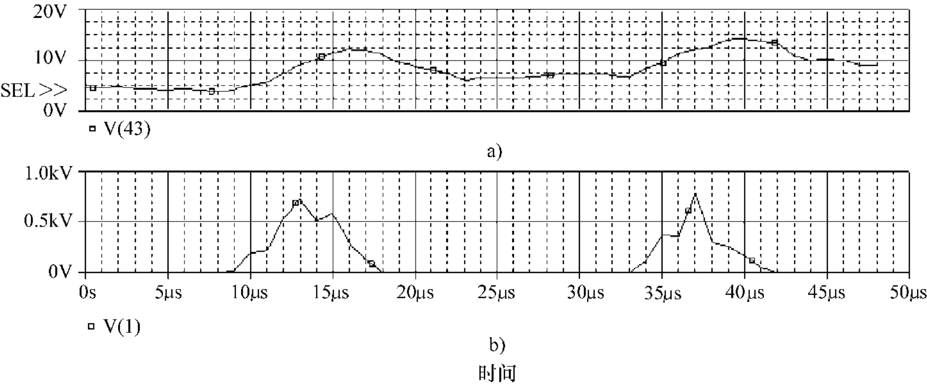


图 8-23　a）温度（℃）V（43）；b）辐射（W/m^2）V（1）

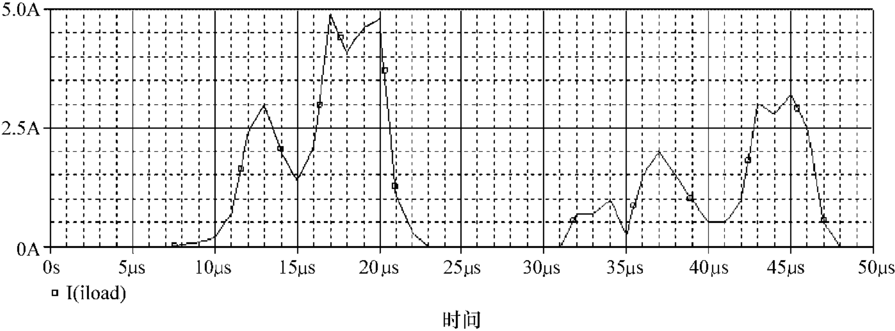


图 8-24　交流负载电流（A rms）

再次使用式（8-8），因为 PV 系统提供的总能量为负载消耗能量减去由电网提供的能量，逆变器容量可以得到如下：

$$P_{nom}>P_{ACpeak}=\frac{E_{AC}}{D\ \overline{PHS}}=\frac{11300Wh}{22.8h}=2017.14W$$

峰值功率 2.5kW 的逆变器可以满足要求：

$$N_{pG} = \frac{I_{max}}{I_{mMr}} = \frac{15A}{4.9A} = 3.06$$

选 $N_{pG} = 3$。

$$N_{sG} = \frac{P_{ACpeak}}{\eta V_{mMr} N_{pG} I_{mMr}} = \frac{2107.14W}{0.91\ 17.3V\ 3\ 4.9A} = 8.7$$

选 NSG = 9。

需要的 PV 发电装置的总面积是：

$$A = 0.7m^2 \times 3 \times 9 = 18.9m^2$$

写出相应的 PV 发电系统仿真网表如下：

```
******* Example 8.4 Small grid connected PV system with AC loads
*Example8.4.cir
.include generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.9, vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=9 npg=3
.inc madrid2.stl
vmesur 1 0 stimulus vmadrid_hour
.inc MadridT2.stl
vtemp 43 0 stimulus vtemp_madrid
db 3 4 diode
.model diode d(n=1)
.inc inversor9.cir
xinvert 4 0 16 20 30 inv params: nf=0.85,Vmin=40
Rm 16 0 1
.include Madrid_load.stl
iload 16 200 stimulus iload_madrid
Vref 200 0 dc 0

eE 7 0 value={(sdt(1e6*220*v(16)))}
eEgrid 101 0 value={(sdt(1e6*220*i(Vref)))}

.tran 0.51u 48u
.probe
.end
```

从网表可知，和例 8.3 一样，电网已由一个简单的电阻 R_m 取代。如同可以获得 L_1 电流变化一样，可以获得 R_m 的电流变化，可以在图 8-25 中看到，此时电流呈现正值，说明逆变器注入到 L_1 线的 AC rms 电流比负载需要的 AC rms 电流大。

负载电流所导致的相应的交流负载消耗的能量，可以从下列语句求得：

eE 7 0 value = {(sdt(1e6 * 220 * v(16)))}

Vref 200 0 dc 0

其中 V_{ref} 作为一个电流传感器被引入，压控源 eE 如在例 8.3 中那样用来计算负载所消耗的能量。图 8-26 显示了 eE 源端口的电压波形 V（7），该电压代表了所消耗能量的波形。

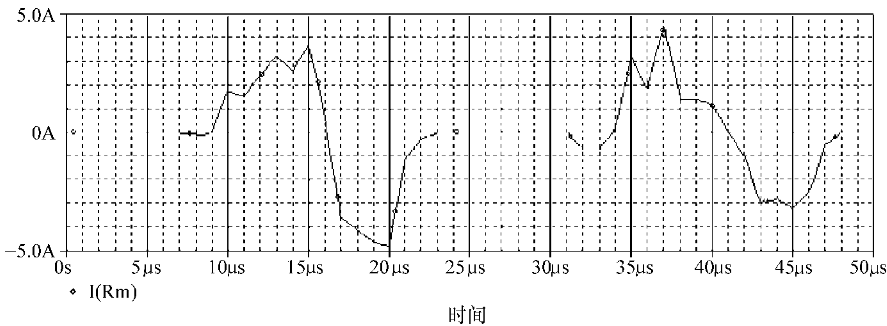


图 8-25 L_1 的电流曲线

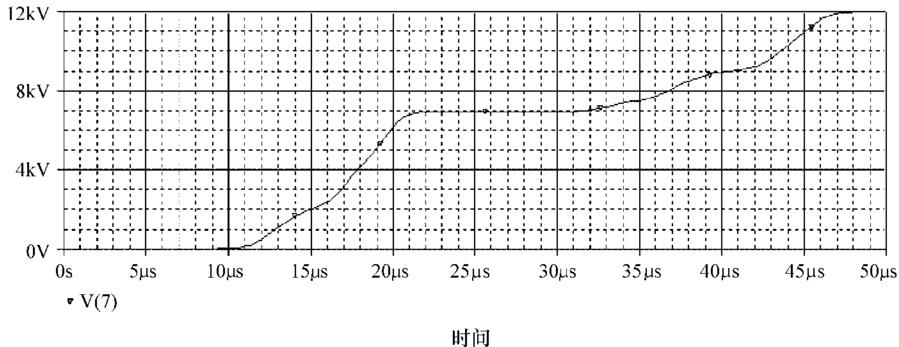


图 8-26 AC 负载需要的能量（kWh）

如果没有 PV 发电系统，建筑消耗的这些能量应该从电网获得，总能量为 12kWh。

第二个受控电压源以类似的方式被列入网表，通过压控源 eEgrid 来计算有 PV 发电系统时输入 L_1 的真实能量：

```
eEgrid 101 0 value = {(sdt(1e6 * 220 * i(Vref)))}
```

图 8-27 为真实能量变化曲线 V（101）。

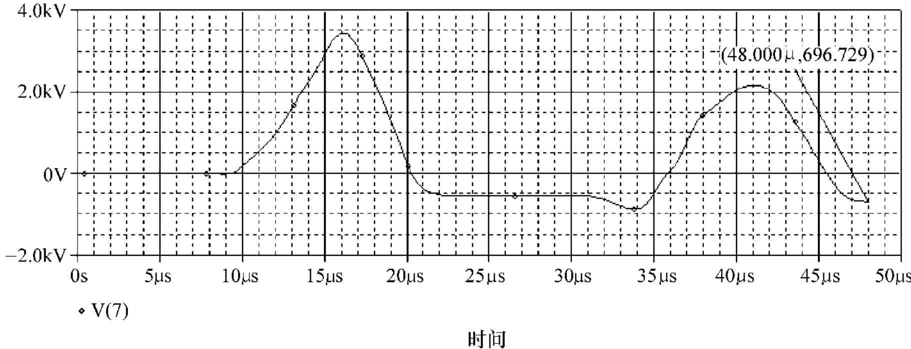


图 8-27 输入 L_1 的能量（kWh）变化图

可以看出，PV 发电系统并没有提供足够的能量，并在仿真的两天结束时，696.729Wh 的差额能量必须由公用电网提供。

8.7　习题

8.1　仿真一个并网交流发电装置。交流发电装置由 2 个串联 ×2 个并联模块和一个具有以下特性的小逆变器组成：

1）PV 组件由 36 个太阳电池串联组成。模块 pic 功率为 85W，MPP 的坐标 $I_{mmr}=4.9A$ 和 $V_{mmr}=17.3V$，其开路电压 $V_{ocmr}=21.2V$。

2）AC 模块包括所描述的 PV 组件和效率为 90% 的小型逆变器。

编写相应的网表，在 $250W/m^2$ 和 $1000W/m^2$ 的辐照条件下，求出交流发电装置的输出电流和功率。环境温度为 19℃。

8.2　仿真一个为住宅屋顶设计的小型 PV 系统，最大功率为 5kW。PV 系统的详细情况如下：

1）PV 发电装置：由 90 个 55Wpic 的模块组成，$N_{sG}=10$，$N_{pG}=9$。PV 模块由 366 块太阳电池组成，模块的特性如下：MPP：$I_{mmr}=3.4A$，$V_{mmr}=16.2V$，短路电流 $I_{scmr}=3.7A$，开路电压 $V_{ocmr}=20.5V$。

2）逆变器参数：额定功率为 4.00kW，单相输出，交流电压 220V 有效值，效率 $nf=0.85$。最小输入直流电压为 30V。

3）交流负载也连接到逆变器输出。选择任意的日负荷需求，但保证能源需求总量为 4MWh/年。

对这个 PV 系统进行一年的仿真评估。PV 系统所在地区的温度和辐照度已知，必须使用 . stl 形式的文件进行仿真。

估算系统的能量平衡，获得一年内需要从电网获得或注入到电网的总能量，和 PV 系统产生的总能量。

参 考 文 献

[8.1] He, W., Markvart, T., and Arnold, R., 'Islanding of grid-connected PV generators: experimental results', *Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion*, Vienna, Austria, July 1998, pp. 2772–5.

[8.2] Roop, M.E., Begovic, M., and Rohatgi A., 'Prevention of islanding in grid-connected photovoltaic systems', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **7**, 39–59, 1999.

[8.3] Hernández, J.C., Vidal, P.G., and Almonacid, G., 'Analysis of personal electric risk in photovoltaic systems using standard electronic circuit simulator', *Proc. of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, June 1997, pp. 1062–5.

[8.4] Wills, R.H., Hall, F.E., Strong, S.J., and Wohlgemuth, J.H., 'The AC photovoltaic module', *Proc. of the 25th IEEE PVSC*, Washington DC, May 1996, pp. 1231–4.

[8.5] Woyte, A., Belmans, R., Mercierlaan, K., and Nijs, J., 'Islanding of grid connected AC module inverters', *Proc. of the 28th IEEE PVSEC*, Anchorage, Alaska, September 2000, pp. 1683–6.

[8.6] Moreno, A., Julve, J., Silvestre, S., and Castañer, L., 'SPICE macromodelling of photovoltaic systems', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 293–306, 2000.

第 9 章　小型 PV 系统

摘要：本章主要介绍由少量几片 PV 电池或者模块组成的、运行在自然光源或人造光源条件下的微型 PV 实际系统。鉴于人造光源的光谱不同于自然光源的光谱，综合考虑人造光源的不同光谱和光通量与辐射度之间的对应关系，计算实际的光源辐照度。需要用到辐射度和光通量之间的对应关系。给出微型 PV 模块的随机伏安特性；基于蒙特卡罗方法生成的随机数，生成随机时间序列的 PSpice 仿真辐照度，同时实现微型 PV 模块的随机伏安特性。用这个方法分析太阳能袖珍计算器、闪烁灯以及路灯等实用装置的工作原理。

9.1　介绍

PV 系统受到普通人的关注，不仅因为媒体连篇累牍地报道大型 PV 电厂或独立自治系统，更重要的是微型 PV 系统为人们的诸如手表、袖珍计算机、汽车天窗等日用品和专业系统提供了廉价的供电方案。因此，本章主要研究由这些微型 PV 系统引出的特殊问题。

9.2　小型 PV 系统的特殊要求

一般来说，微型 PV 系统是一个独立供电系统或者是用于延长蓄电池组供电时间的辅助供电系统。也就是说，我们所研究的系统中包括了蓄电池组，因此在第 7 章中研究独立系统所提出的大部分概念也适应于本章。不过，二者之间仍有差异。在微型 PV 系统中（例如手表），因为太阳光（或更一般的光）的可利用能量经常是不可预测的。而且，这里所说的光的特性和光谱不同于传统独立系统或并网系统的特性与光谱（例如台灯的灯光）。另外，负载特性也有别于一般的家用电器的特性，譬如 LED 已经成为一种用于照明的普通装置。最后，由于这些装置只是要求增强蓄电池的供电不是使用太阳能来平衡自治系统的能量，所以系统整体的要求也是不同的。本章主要研究这些差异性和特殊性。

9.3　辐射度和光通量

太阳电池或者模块通常在标准的辐照条件下运行（AM 1.5G 或者 AM0 的电气特性是已知的），而办公室或者家庭的人工光源的电气特性是未知的，因此如何设

计在人工光源下运行的微型 PV 系统成为一个应该讨论的问题。首先，人造光和太阳光有不同的光谱辐照度。其次，人造光是通过光通量来度量的，而非辐射度。两种光源的主要区别在于对可见光照度的测量方法不同，而光通量是一种通过函数 $V(\lambda)$ 对可见光的度量方法，人造光源着重于度量人眼对不同波长可见光的灵敏度，即 CIE 灵敏度曲线。实际中有两个 CIE 灵敏度曲线，一个是亮度视觉响应，另一个是暗度视觉响应。本书中主要研究亮度视觉响应。图 9-1 给出了以 500nm 波长为标准的 CIE 灵敏度归一化曲线。此数值文件在附录 I 中，文件名为"cie. stl"。

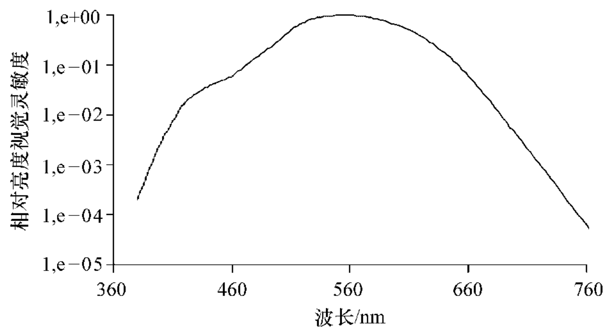


图 9-1　亮度 CIE 响应率曲线 $V(\lambda)$

表 9-1 总结了一些重要的物理量和单位比较。

一般情况下，微型 PV 系统通常使用光照度单位，也就是 PV 电池可利用能量的数值。另一方面，人造光源用下面两个物理量来度量：

电功率消耗（W）和光辐射通量（lm）。

表 9-1　辐射度与光通量

辐射量	单位	光照量	单位	以波长为 555nm 基准的转换系数（亮度通量）
辐射通量	W	光通量 Φ_v	lm	$1lm = 1.464 \times 10^{-3}W$ $1W = 683lm$
辐照度	W/m^2　G	照度 G_V	lux	$1lux = 1lm/m^2$ $1W/m^2 = 683lux$
辐射强度	W/sr	光强	lm/sr	1lm/sr = 1 坎德拉

9.4　光通量和照度

通常，由光源发出的光辐射通量通过一段距离传输到 PV 电池，因此 PV 系统可接收到的照度取决于光源到接收装置的几何距离。下面介绍一些有用的概念。

9.4.1 距离平方律

球面度（sr）是立体角的单位。球面度乘以 4π 等于其对应球面的表面积。基于上述定义，对于同一个光源，若两个接收器的距离分别为 d_1 和 d_2，则两个接收器接收照度的相对值为

$$\frac{G_{v1}}{G_{v2}} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \tag{9-1}$$

上述公式为距离平方律。

9.4.2 光通量和照度之间的关系

如图 9-2 所示，当给定接收器到光源的距离为 d，以 lux 为单位的照度 G_v与以 lm 为单位的光通量 Φ_v之间的关系如下式：

$$\Phi_v = G_v d^2 \Omega \tag{9-2}$$

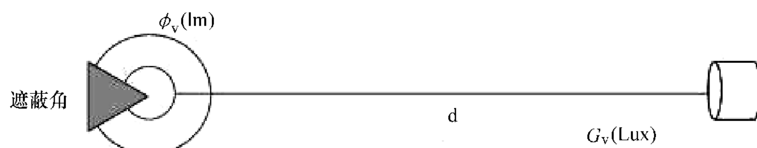


图 9-2　用于定义光通量几何图

式中，d 是光源和接收器之间的距离，Ω 是光源的立体角，如果光源可以被看成一个各向同性的发光质点，则立体角是 4π。假如由于遮蔽而使得光源辐射被限制在一个较小的立体角，立体角公式如下：

$$\Omega = 4\pi - 2\pi\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right) \tag{9-3}$$

其中，α 为遮蔽角。

例 9.1　设在距路灯 5m 处的照度为 20lux，遮蔽角为 60°，试计算这个灯的光通量。

$$\Omega = 4\pi - 2\pi\ (1 - \cos 30°)\ = 11.619\text{sr} \tag{9-4}$$

光通量的计算结果为：

$$\Phi_v = 20\ (5)^2 11.619 = 5809.5\text{lm} \tag{9-5}$$

9.5 人造光源产生的 PV 电池短路电流密度

在第二章已经介绍了 PV 电池的短路电流计算公式，短路电流密度定义如下：

$$J_{sc} = \int_0^\infty 0.808\text{QE}(\lambda)\lambda I_\lambda \text{d}\lambda \tag{9-6}$$

例如当太阳电池接收标准光谱照射 AM 1.5 时，短路电路密度等于光谱电流密度对所有波长的积分；辐照度等于辐射光谱 I_λ 的积分，即

$$G = \int_0^{\infty} I_\lambda \mathrm{d}\lambda \tag{9-7}$$

对于人造光源，基于光学常识，通过光源点到接收器之间的距离计算照度 G_v。光谱照度定义如下：

$$G_v = \int_{360\mathrm{nm}}^{760\mathrm{nm}} I_{\lambda(\mathrm{art})} K_m V(\lambda) \mathrm{d}\lambda \tag{9-8}$$

式中，K_m是发光效率。对于亮度 CIE 曲线，K_m数值上等于683lux/W/m^2；$I_{\lambda(\mathrm{art})}$是人工光源的光谱辐照度，$V(\lambda)$为白天亮度 CIE 视觉响应特性。

人造光源的光谱是以最大值为基准的标幺值 $I_{\lambda(\mathrm{art})\mathrm{norm}}$，图 9-3 给出了一个实例[9.1]。

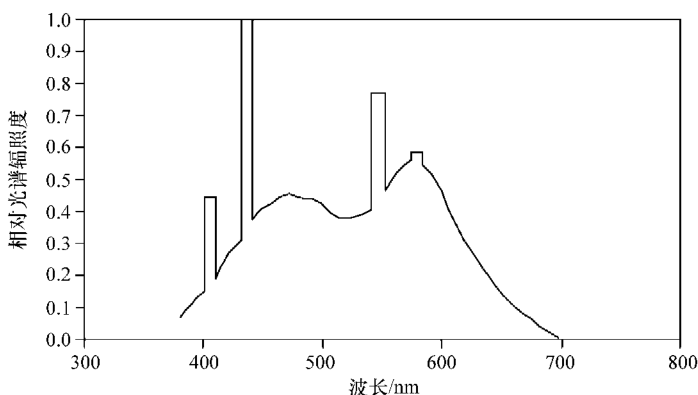


图 9-3　荧光灯光谱

为了方便计算，选择一个比例因子 K，使得归一化的人造光源的光谱产生的照度为单位 lux，如下式表述：

$$K \int_{360\mathrm{nm}}^{760\mathrm{nm}} I_{\lambda(\mathrm{art})\mathrm{norm}} K_m V(\lambda) \mathrm{d}\lambda = 1 \tag{9-9}$$

计算式（9-9）的 PSpice 文件如下：

```
*normalization.cir
.include fluorescent_rel.stl
.include cie.stl
.param k=0.0292
vfluor 90 0 stimulus vfluorescent_rel
vcie 91 0 stimulus vcie
elux 92 0 value={sdt(v(90)*v(91)*k*683*1e6)};computes the illuminance
.tran 0.01u 0.770u 0.38u 0.01u
.probe
.end
```

其中，在 .stl 文件中，荧光灯的归一化光谱和 CIE 曲线分别作为节点（90）和节点（91）的电源。给定归一化常数 K 和照度 G_v 条件下，式（9-9）的积分运算可

以使用 E－源 elux2 完成，如图 9-4 所示。令 $K=0.0292\ \mathrm{W/m^2\mu m}$，用 elux2 计算光谱辐照度和 CIE 曲线乘积对波长的积分（常数 $K=0.0292\mathrm{W/m^2\mu m}$）。在此条件下，式（9-9）的积分值等于 1。

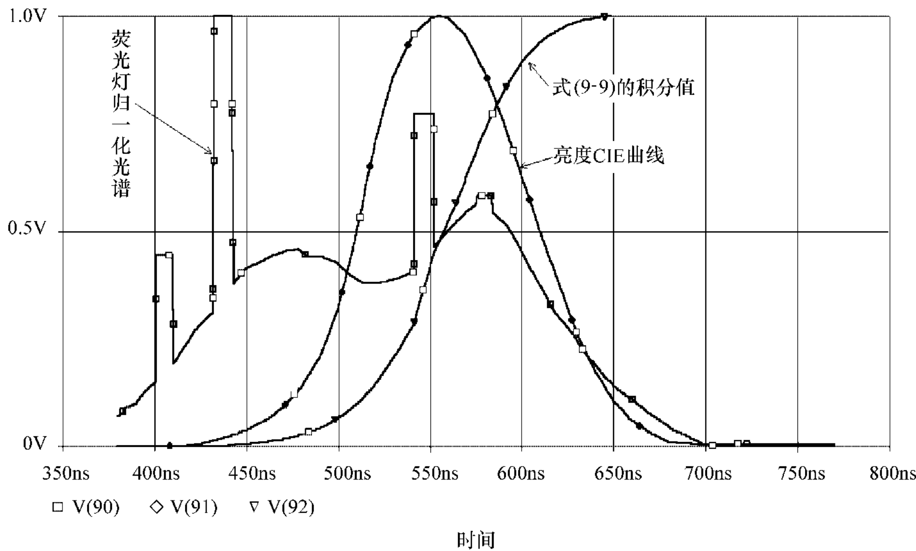


图 9-4　荧光灯光谱辐照和人眼亮度 CIE 响应特性曲线

注：二者均采用了标幺值，当 $K=0.0292$ 时，通过对可见光光谱的积分，式（9-9）的积分结果为单位 lux，x 轴波长单位为 nm。

当 K 值确定后，对应单位 lux 照度的光谱辐照度由下式确定：

$$I_{\lambda_1_(\mathrm{art})}=KI_{\lambda(\mathrm{art})\mathrm{norm}}=0.0292I_{\lambda(\mathrm{art})\mathrm{norm}} \tag{9-10}$$

已知 PV 电池的量子效率，可以计算出单位 lux 照度人造光源下 PV 电池产生的短路电流值：

$$J_{\mathrm{sc(art)}}=\int_0^\infty 0.808\mathrm{QE}(\lambda)\lambda I_{\lambda(\mathrm{art})}\mathrm{d}\lambda \tag{9-11}$$

因此，若照度 G_v 为非单位值，则对应的短路电流需要用下式修正：

$$J_{\mathrm{sc(art)}}=G_v 0.0292\int_0^\infty 0.808\mathrm{QE}(\lambda)\lambda I_{\lambda_1_(\mathrm{art})}\mathrm{d}\lambda \tag{9-12}$$

图 9-5 给出了曾经在第 2 章叙述和仿真的硅型 PV 电池的光谱电流密度。为了比较两种不同光源光谱的影响，图中给出了两条曲线。第一条曲线在 AM1.5 标准下光照为 $100\mathrm{W/m^2}$ 时电池的光谱电流密度，而一条曲线则为 5000lux 照度时电池的光谱电流密度。在计算人造光源时，使用了附录 I 给出的“jsc_silicon_art.cir”文件，附录中同时也给出了“jsc_art.lib”子电路。

仿真结果如图 9-5 所示。

可以看到，在波长较长的波段[1]，AM1.5 光谱产生电流密度高于荧光灯，其原

[1] 波长较长的波段范围是 0.7～1.5μm。——译者注

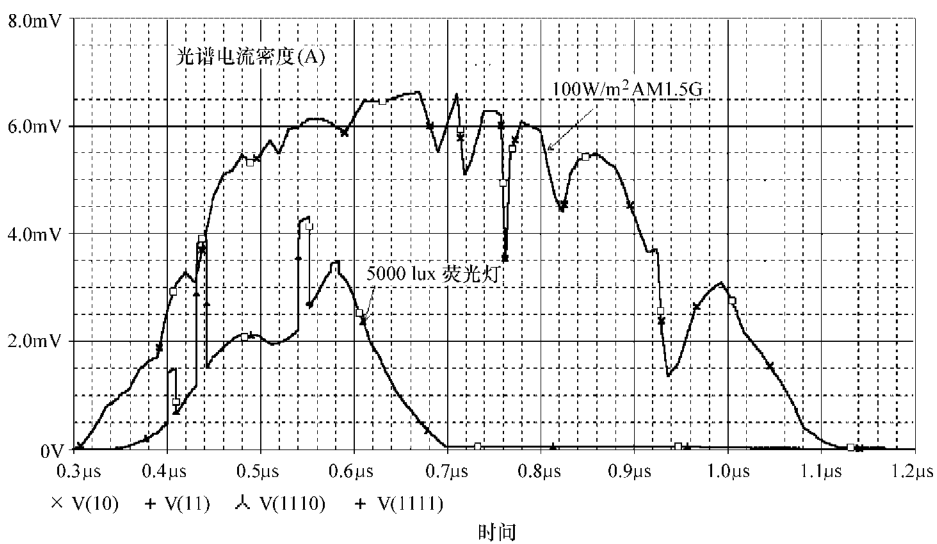


图 9-5 在荧光灯 5000lux 和 AM1.5 G 标准 100 W/m² 两种情况下光谱电流密度对比图

注：x 轴波长单位为 μm，y 轴光谱电流密度单位为 mA/cm² μm。

因是荧光灯几乎没有这个波段的光谱成分。

9.5.1 照度的影响

前面已经证明，在忽略温度对短路电流的影响的情况下，照度与短路电流呈线性关系：

$$J_{sc(art)} = J_{sc_1(art)} G_v \tag{9-13}$$

$J_{sc_1(art)}$是在照度为单位 lux 时产生的短路电流密度值。

9.5.2 量子效率的影响

如第 2 章所述，在给定波长参数下，量子效率的值取决于反射系数、吸收系数，诸如电池厚度和发射层深度等电池的几何参数，诸如寿命和迁移率的半导体材料参数，也取决于表面复合速率之类的技术参数。

如果使用不同的参数和不同光源仿真 PV 电池的短路电流密度，则其结果比较列于表 9-2 中。

表 9-2 比较不同光源和不同类型电池所产生的短路电流

	1#标准电池	2#标准电池，表面复合率为 1cm/s	3#电池增加扩散长度，其余参数与 2#电池相同
J_{sc}（AM1.5 @1kW/m²）（mA/cm²）	31.811	32.672	36.67

（续）

	1#标准电池	2#标准电池，表面复合率为 1cm/s	3#电池增加扩散长度，其余参数与 2#电池相同
J_{sc} （1lux）（nA/cm^2）	121	123	128.9
Ratio（1lux/AM1.5）	3.8×10^{-6}	3.79×10^{-6}	3.51×10^{-6}

由上表可知，人造光与日光产生短路电流的比率几乎与 PV 电池的参数无关。因此，硅型 PV 电池的比率可以近似用下式估计：

$$\frac{J_{sc(art)}(1lux)}{J_{scr(AM1.5@1kW/m^2)}}\approx3.8\times10^{-6} \tag{9-14}$$

当然，不同类型电池和不同光源还需要计算新的比率。

如果 PV 电池同时接收人造光和日光，参照式（9-14），则总短路电流计算公式为：

$$J_{sceff}\approx J_{scr(AM1.5)}\left(\frac{G}{G_r}+3.8\times10^{-6}G_v\right)=J_{scr(AM1.5)}\frac{G_{eff}}{G_r} \tag{9-15}$$

其中，G_{eff}为有效辐照度，在 $G_r=1000$ 时通过下面公式计算：

$$G_{eff}=G+3.8\times10^{-3}G_v \tag{9-16}$$

例 9.2 在一个光通量为 8000lm 的房间内，袖珍计算器配置了一个由 4 块电池串联组成，总受光面积为 $2cm^2$ 的微型 PV 阵列。光源带有一个近似半球辐射的反光罩。放置在桌面上的计算器距离光源 1.6m。PV 阵列在标准的 AM 1.5 光照条件下产生 $20mA/cm^2$ 的短路电流密度。试计算在 25℃人造光源时产生的短路电流。

首先计算 PV 电池接收的照度：

$$G_v=\frac{\Phi_v}{d^2\Omega}=\frac{8000}{1.6^2 2\pi}=497.6lux \tag{9-17}$$

其中，立体角为 2π 表示了半球辐射。

其次，计算短路电流密度：

$$J_{sc(art)}\approx3.8\times10^{-6}J_{sc(AM1.5)}G_v=3.8\times10^{-6}\times20\times10^{-3}\times497.6=37.8\mu A/cm^2 \tag{9-18}$$

PV 阵列由 4 个面积为 $0.5cm^2$ 的 PV 电池组成一个串联阵列，因此，总短路电流为：

$$I_{sc(art)}\approx37.8\times10^{-6}\times0.5=18.9\mu A \tag{9-19}$$

9.6 在人造光源照射下 PV 电池的伏安特性曲线

倘若已知电池的量子效率、光谱和照度，如 9.5 节所述，则可以计算出人造光

源产生的短路电流。如第 2 章所述，暗饱和电流密度与光谱无光，所以可以得到开路电压以及完整的伏安特性曲线。因此，根据在 AM1.5 标准条件下短路电流和开路电压额定值计算出的结果仍然是适用于人造光源的情况。

9.7　AM1.5G 光谱的照度等效

室内 PV 设备接收人造光和自然光的随机混合光。对于同一用户和不同用户的位置或活动而言，混合光在时间上具有随机性。在家庭和办公室内，自然光的光谱分布不同于本书所介绍的 AM1.5 标准光谱，而是依赖于环境。因为电池生产商是在 AM 1.5 标准光谱下获取的技术参数，所以 AM1.5 标准光谱的辐照度与照度的转换系数或等效是十分有用的。AM 1.5G（1000W/m^2）光谱的照度可以通过下式求取：

$$G_v = \frac{1000}{962.5}\int_{360\mathrm{nm}}^{760\mathrm{nm}} I_\lambda K_m V_\lambda \mathrm{d}\lambda \tag{9-20}$$

I_λ 为光谱 AM 1.5 的辐照度。AM 1.5 G（1000 W/m^2）的基准辐照度由下式计算：

$$G_r = \frac{1000}{962.5}\int_0^\infty I_\lambda \mathrm{d}\lambda \tag{9-21}$$

可以简单地运用 PSpice 计算式（9-20）和式（9-21）（文件名为 illuminace_am15g.cir），其结果的等效值为 109.87lux 每W/m^2。

```
*illuminance_am15g.cir
.include am15g.lib
.include cie.stl
.param g=1000
xam15g 90 0 am15g
vcie 91 0 stimulus vcie
eilluminance 92 0 value={sdt(v(90)*683*v(91)*g/1000*1e6)};irradiance
.tran 0.01u 0.770u 0.38u 0.01u
.probe
.end
```

例 9.3　考虑两种光源，一种光源具有 AM 1.5 G 光谱（文件名为 am15g.lib），另一种为荧光灯光谱（文件名为 fuorescent_rel.stl），PV 电池使用第 2 章例 2.2 中的基准参数。

1）500lux 照度荧光灯的光谱能够产生 60.5μA/m^2 的短路电流密度。试求产生相同数的短路电流密度所需 AM 1.5 G 光谱的辐照度。同一块电池在 AM 1.5 G 辐照度下产生的短路电流为 31.81mA/m^2，所以

$$J_{sc} = \frac{G}{G_r} J_{sc}(1\mathrm{sun}) = 60.5\mu\mathrm{A/cm}^2 \tag{9-22}$$

则

$$G = \frac{G_r 60.5\mu A/cm^2}{31.81mA/cm^2} = 1.90W/m^2 \quad (9\text{-}23)$$

2）利用荧光灯光源程序计算在 500lux 照度下对应的辐照度。

编写一个程序：

```
*irradiance_art.cir
.include fluorescent_rel.stl
.param gv=500
.param k=0.0292
vfluor 90 0 stimulus vfluorescent_rel
eIRRAD 92 0 value={sdt(v(90)*k*gv*1e6)};irradiance
.tran 0.01u 0.770u 0.38u 0.01u
.probe
.end
```

V（92）返回在 500lux 照度下荧光灯对应的辐照度，其数值等于 1.694W/m^2。

9.8 随机蒙特卡罗分析

PSpice 具有蒙特卡罗分析和最坏情况分析的功能。工作在办公室或家庭环境下的便携式设备，随机地选择并混合地使用辐照度和照度[㊀]及其混合光。

因为 PSpice 包含蒙特卡罗分析，且考虑到 PV 板接收的辐照度是自然光和人造光混合后产生的有效辐照度，其中，自然光由一个特定辐照度的 AM1.5 光谱表示；人造光由一个特定照度的荧光灯表示，所以这个软件很适合这种情况的分析[㊁]。

依据活动的类型和可视度的程度推荐家庭或办公环境的照明水平：对于平均可视度或短时间高可视度的场所，其典型值为 500lux；而进行高精确度活动的场所，典型值上升到 1000lux，低可视度的活动场所可以减低到 250lux。

一个产生随机照度和辐照度的方法是给电流源两端并接一个电阻，其中电流源模拟辐照度和照度，而电阻的阻值是一个给定容差和概率分布函数的随机数。用这个电路可以进行蒙特卡罗分析。下面我们介绍蒙特卡罗分析命令。

通用形式如下：

㊀ 这里指自然光和人造光。——译者注

㊁ 这里指混合光照。——译者注

The general form is:

.mc <nr of runs> <analysis> <output variable> <function> <seed> <options>

where,

<nr of runs> is the number of analyses to be performed;
<analysis> is the analysis type, DC, tran or AC;
<output variable> set to YMAX computes the absolute maximum difference between the nominal run and each run;
<seed> value has to be an odd integer from 1 to 32 767;
<options> list or print the values of the random variables used in each run.

自然光和人造光的混合光的随机产生必须依据式（9-16）。为此，将辐照度和照度的标称值送给分别称为“gnat”和“gart”的两个 g－源，并且在电流源两端并接一个电阻。然后，用下面语句给定电阻的容差值：

. model resist res（r = {xnat} dev/uniform 40%）

其中，“xnant”是标称值和容差为 40% 的均匀分布概率。也可以使用不同的概率分布，请读者参考 PSpice 手册。

最后，利用式（9-16）能够计算出在容差范围内的任何有效辐照度。完成这个计算的文件是如下“irradiance_eff. lib”的 PSpice 程序：

```
*irradiance_eff.lib
.subckt irradiance_eff 900 920 params:irrad=1, xnat=1, gv=1, xart=1
gnat 900 910 value={irrad}
rnat 910 900 resist {xnat}
.model resist res (r=xnat dev/uniform 40%)
gart 900 930 value={gv}
rart 930 900 resist_art {xart}
.model resist_art res (r={xart} dev/uniform 40%)
eirradeff 920 900 value={v(910)+3.8e-3*v(930)}
.ends irradiance_eff
```

上述支路实现了式（9-16）的求解。因为这个方程源于硅型 PV 电池的特性，所以对于不同材料的电池，运算精度会有所差异。精度误差源于不同材料具有不同量子效率。因为式（9-16）实际上刻画出同一块电池在两种不同类型光源下的相对值，所以材料类型对精度的影响不大。为了简便起见，式（9-16）贯穿全书。

现在，用这个子电路生成一个具有蒙特卡罗分析功能的 PV 模块随机序列伏安特性。PV 模块的描述如文件“montecarlo. cir”。

```
*montecarlo.cir
.include irradiance_eff.lib
.include module_beh.lib
xirrad_eff 0 92 irradiance_eff params: irrad=10, gv=500, xnat=1, xart=1
xmodule 0 92 93 94 95 96 97 98 99 module_beh params: iscmr=8.5e-3 coef_iscm=0 vocmr=2.8
+ coef_vocm=0 pmaxmr=14.2e-3 tr=25 noct=47 ns=4 immr=7.06e-3 vmmr=2.01
vbias 94 0 dc 0
vtemp 93 0 dc 25
.dc vbias 0 3.5 0.01
.mc 10 dc i(vbias) ymax seed=9321 list output all
.probe
.end
```

由此可见，在该文件中，建立了一个电路模型，包含了在第 4 章用子电路描述 PV 模块的文件“module_beh”，并且专门建立了一个 4 块特定参数电池组成的串联阵列。这些参数能够代表袖珍计算器用的多晶硅电池特性。还能够看出，因为计算器是在大约为 25℃的恒定室温环境中运行，所以认为电压和电流的温度系数为零。直流分析允许使用蒙特卡罗方法。

为了验证随机数发生器产生自然光和人造光的数值是不相关的，用图 9-6 显示这些数据。用蒙特卡罗分析得出 10 组伏安特性图，如图 9-7 所示。

最大功率点对应的坐标值如图 9-8 所示。

可以看出，最大功率对应的平均电压近似等于常量 2. 494V，方差为 3mV；最大功率对应的平均电流为 88. 45μA，方差为 12. 29μA。

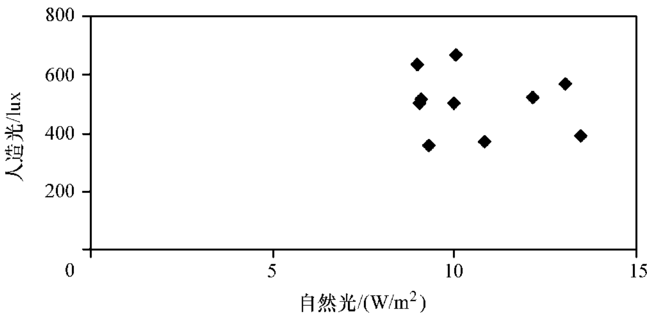


图 9-6　自然光和人造光的随机数

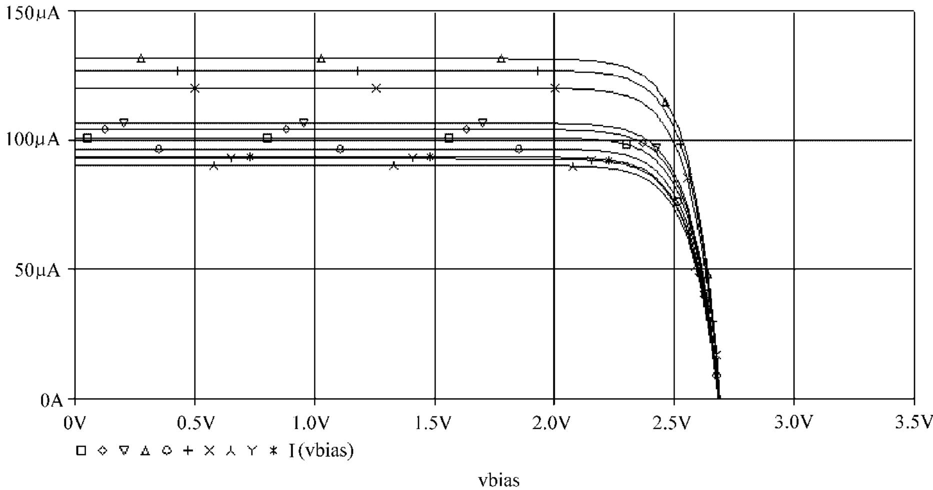


图 9-7　一个 PV 模块的随机伏安特性

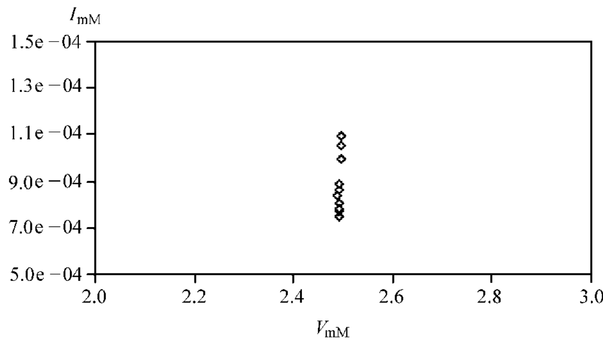


图 9-8　由随机人造光和自然光产生最大功率点所对应的电压和电流坐标值

9.9　典型应用研究：太阳能袖珍计算器

普遍应用的商品之一是由微型 PV 电池阵列提供部分电能的袖珍计算器。目前，CMOS 电子器件能在低电压下工作，其典型值低于 2V，并且消耗少量的电能，所以微型 PV 阵列足以提供其所需的全部电能，或延长电池的寿命。通常，这些装置在办公室、家庭、超市和商店等场所使用，这些场所的照明正是上节所说的自然光和人造光的混合光。

袖珍计算器由一个微型 PV 阵列直接供电或由 PV 阵列和电池的组合系统供电。其主要任务是由 PV 阵列产生足够的电能为计算器供电。袖珍计算器耗能非常小，典型值为 1.5V 和微安量级的电流。典型供电装置是由 0.5cm^2 的 4 个多晶硅型 PV 电池组成的串联阵列。许多厂家生产的多晶硅均能满足需求，多晶硅型 PV 电池使用了单结到三结技术，以便提高效率。下面通过一个例子直观地表示 PV 袖珍计算器的工作原理。

例 9.4　设太阳电池袖珍计算器使用了 4 个 2cm^2 的太阳电池串联阵列，在 AM1.5 *G*（1000W/m^2）标准下参数为：$V_{ocr}=2.8V$，$I_{scr}=8.5mA$，$I_m=7.06mA$，$V_m=2.01V$。

太阳电池使用 500lux 的荧光灯人工光源和辐照度为 10W/m^2的自然光源。两种光源的强度变化以容差为 40% 的均匀概率随机变化。

在图 9-9 所示电路中，蓄电池为非可再充电蓄电池，需串联一个防止电流反向流动的二极管。假定负载为 3.5μA 的恒定负载，这个数值是此类产品中所使用的低耗型 CMOS 电路的典型值。使用附录 I 中的 pocket_calculator.cir 文件进行仿真，结果如图 9-10 所示。

为了分析电路的实际运行，我们认为照明光源具有脉冲特性。正如观察，开始阶段无光照，蓄电池的输出电压下降（近似为 1.3V）。当脉冲光源出现时，电容

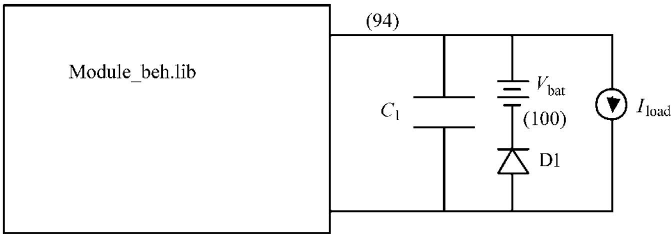


图 9-9　袖珍计算器（供电）电路

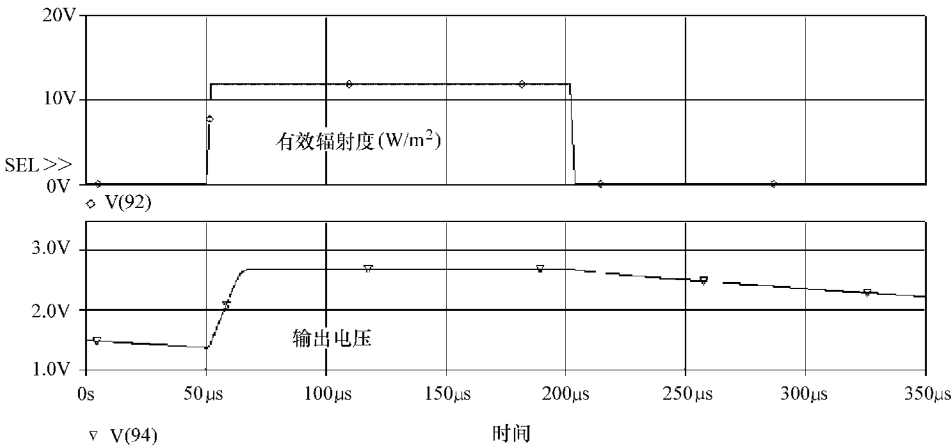


图 9-10　a）有效辐照度；b）输出电压

和阵列的输出电流急剧增加，这意味着 PV 阵列为负载提供电流并向电容充电。同时输出电压上升并设定为 2.6V，因此二极管反偏，蓄电池不再向负载供电。为了更精确地观察电路的运行曲线，我们仅使用 500lux 的人造光源，结果如图 9-11 所示。

可以看出，PV 阵列的输出电流给电容充电，并为负载供电。一旦光脉冲消失，电容向负载供电直到电池再一次向负载供电。

9.10　LED 照明

目前技术提供了不同波长的高强度 LED，依据其颜色和光强的要求，可以用于很多场合。LED 的波长从蓝光氮化镓的 430nm 到红光铝砷化镓的 660nm。

表 9-3 列举了几种可用的 LED 产品及其额定电压和电流[9.2]。日益增加发光强度使得 LED 适用于交通信号灯或普通照明。

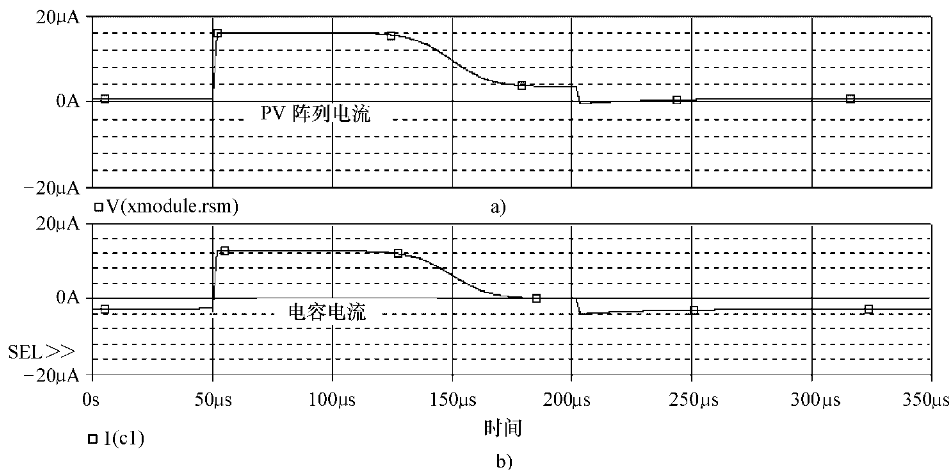


图 9-11　a）在 500lux 照度人造光源照射下袖珍计算器所用 PV 阵列的电流；b）其电容的电流

表 9-3　LED 特性的总结

波长/nm	材料	电压/V	典型电流值/mA	20mA 时发光强度/mcd	输出角度（°）
430（蓝光）	GaN	4.8	20	12	20
473（蓝光）	AlInGaP	3.5	20	1100	15
565（绿色）	GaP	2.2	20	40～60	60
595（黄色）	AlInGaP	1.8	20	100～400	60
605（橙色）	AlInGaP	1.9	20	1300～8000	30～8
626（红色）	AlInGaP－AlGaAs	1.85～1.9	20	20～1200	130～50

通常 LED 的主要参数为输入电流和发光强度（以坎德拉为单位）。它不会发出各向同性的光，但不同类型的 LED 具有不同的照射角，如表 9-3 所示。我们感兴趣的是在可视立体角内由发光强度得到的光通量。光通量是发光强度对立体角的积分。然而在可视立体角内发光强度是均匀的，则光通量由下式确定：

$$\text{光通量} = \text{发光强度} \times \text{立体角}$$

立体角和可视角 γ 的关系是：

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \cos\frac{\gamma}{2}\right) \tag{9-24}$$

通过上面诸式，可以计算出光通量。

例 9.5　假定可视角为 30°，在 2V 和 20mA 的驱动下发光强度为 1300mcd，试依据表 9-3 计算相应 LED 的光通量。发光效率定义为光通量除以电功率。

下面计算 30°可视角对应的立体角为：

$$\Omega=2\pi\left(1-\cos\frac{30^\circ}{2}\right)=0.213\text{sr} \tag{9-25}$$

则光通量为：

$$\text{flux}=1300\text{mcd}\times 0.213\text{sr}=0.276\text{lm}$$

发光效率为：

$$\text{Efficacy}=\frac{\text{Flux}}{\text{Electrical}\cdot\text{power}}=\frac{0.276}{2\times 20\times 10^{-3}}=6.9\frac{\text{lm}}{\text{W}} \tag{9-26}$$

9.11 典型应用研究：光信号报警

本节我们将分析有实用价值的闪烁信号灯。这种灯可能是建筑内的自动报警器或提示信号灯以及危险信号灯。

因为高亮度 LED 灯具有功耗低、发光效率高等优点，所以应用在这些场所是很合适的。作为一个典型的应用，我们考虑由 N_{LED} 个高亮度的橙色 LED 组成一个闪烁灯，其寿命至少等于蓄电池的寿命，略大于 5 年。

首先计算这个系统功耗。假设灯每秒闪烁一次，额定电流为 20mA，持续时间为 85ms，如图 9-12 所示。由定时器（典型为 555 定时器）组成的控制电路所需的连续电流为 0.5mA。

（1）计算等效平均电流。

等效值是图 9-12 所示波形的均值加上其余电子器件的电流消耗。

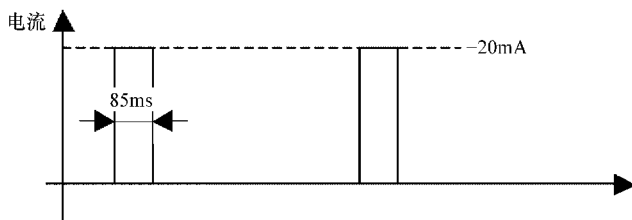


图 9-12　单个 LED 脉冲电流波形

平均电流为：

$$I_{\text{eq}}=0.5\times 10^{-3}+20\times 10^{-3}\frac{85\text{lm}}{1\text{s}}xN_{\text{LEDP}}=0.5+1.7N_{\text{LEDP}}\ (\text{mA}) \tag{9-27}$$

其中，N_{LEDP}是并联 LED 的数目。

（2）计算的 PV 阵列的尺寸。

参照第 7 章的计算结果：

$$I_{\text{PV}}=I_{\text{eq}}\frac{24}{\text{PSH}_{\text{min}}}=6+20.4N_{\text{LEDP}}\ (\text{mA}) \tag{9-28}$$

其中，我们需要考虑电流的安全系数和 PSH 的最小值。在实际应用中，太阳辐射

的随机性伴随着系统安装地点的随机性，建议取水平面上 PSH 的最小值。

在本例中 $PSH = PSH_{min} = 2kWh/m^2$ 每天。

（3）设无光照下的自供电天数为 N_{days}，计算独立蓄电池系统的容量。

$$C_{bat} = I_{eq} \times 24 \times N_{days}(Ah) = (0.012 + 0.0408 N_{LEDP}) N_{days}(Ah) \quad (9\text{-}29)$$

当自供电天数分别为 10、20、30 天时，蓄电池所需的容量与并联 LED 数目的关系如图 9-13 所示。

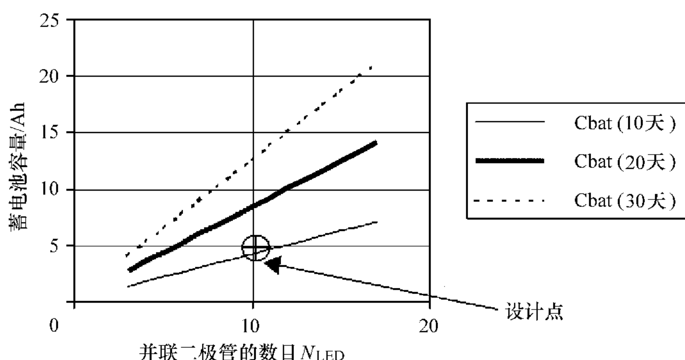


图 9-13　蓄电池容量

（4）假定当地的光照条件满足 $37.5mA/cm^2$ 的 AM1.5（$1000W/m^2$）标准，下面计算 PV 电池板串联组数为 N_{sG} 时的所需面积。

PV 阵列产生的电流等于短路电流密度与面积的乘积，则有：

$$I_{PV} = 6 + 20.4 \times 10^{-3} N_{LEDP} = A \times 37.5 \times 10^{-3} \quad (9\text{-}30)$$

式中，面积 A 的单位为 cm^2，并由下式计算：

$$A = N_{sG}\,[0.16 + 0.544 N_{LEDP}] \quad (9\text{-}31)$$

由此计算出 PV 系统需要的面积。式（9-31）的曲线如图 9-14 所示。

（5）计算 PV 电池阵列的输出电压。

LED 的偏置电压应该大于 1.5V，对于橙色型 LED 其典型值范围为 1.8 ~2V，而驱动电路的供电电压通常为 3 ~18V，则蓄电池的电压为：

$$V_{PV} > V_{bat} + V_d = V_d + N_{LEDS} V_{LED} + V_{driver} + N_{LEDP} I_{LED} R \quad (9\text{-}32)$$

如果选取标称电压为 $V_{bat} = 6V$ 的标准蓄电池，则 LED 串联的数目应限制为 2 个。考虑到二极管的损耗和温度效应，PV 系统输出电压应设定为近似大于 8V。

（6）计算 PV 电池串联的数目 N_{sG}

PV 电池的数量取决于所选 PV 电池的额定电压。假设选择额定值居中的硅型 PV 电池，并且假定在 $1kW/m^2$ 的照度下最大功率点对应的电压大于上面步骤（4）计算出的 V_{PV}。

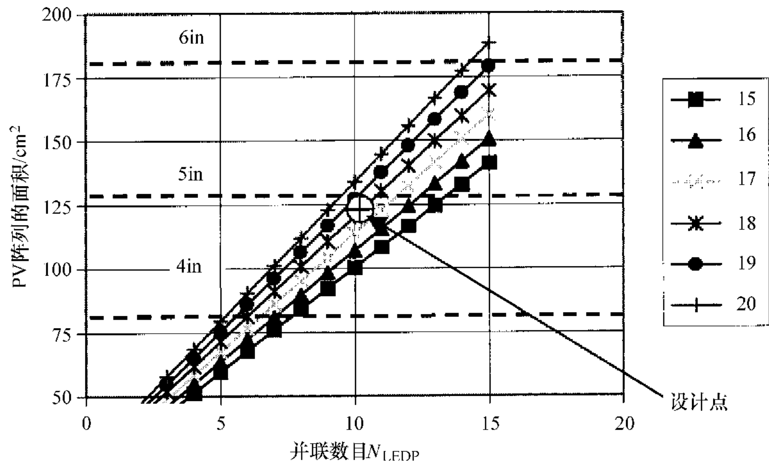


图 9-14 阵列的取值区域：LED 串并联数目为 3～15，PV 电池串联数目为 15～20

$$N_{sG} > \frac{V_{PV}}{V_{mM}} = \frac{8}{0.55} = 14.54 \qquad (9\text{-}33)$$

考虑到式（9-33）是在 1000W/m² 光照条件下得到的额定最大功率点电压，而这种光照条件只有在夏季很少的几天才能出现，因此这意味着 PV 电池串联的数目至少为 15。由此引出增加设计余量的额外约束条件，如图 9-14 所示。

（7）最后的调整。

考虑到安全系数和一些重要的边界条件，最终的设计值需要做适当的调整。这些边界条件适用于 PV 阵列和蓄电池。

市场提供了各种各样的 6V 可重复充电密封铅酸电池，容量为 1～12Ah（在我们的设计范围内）。考虑到所需 LED 数目的具体要求，$N_{LEDP}=10$（我们考虑每串 LED 数量为 $N_{LEDS}=2$）。图 9-14 给出了一个可行解决方案：采用一个 5in 晶片并将其分割为 16 个等同面积的小块。

设计点对应 PV 电池板的面积为 100.8cm²。如果我们用一整片的 5in 晶片，则电流安全系数是所需面积除以晶片的面积。这意味着安全系数大约为 25%。因此，安全系数对考虑切割损耗是有用的。通过查阅蓄电池容量图，并假定无需 PV 系统充电的而仅靠蓄电池供电的天数是：在无日照的条件下，4Ah 的蓄电池大约可以使用 10 天。

9.11.1 PSpice 产生辐射的随机时间时序

使用本节所述的仿真通常称为“最坏月份”设计，设计者希望在冬季弱日照条件下系统也能可靠工作。下面假定元月份为日照最坏情况。

在第 7、8 章，我们已经介绍了如何使用 PSpice 中激励文件随机地生成辐照度的时间序列。获得这样的时间序列，需要获得专用的商业（或版权）软件。为了

扩展仅熟悉 PSpice 软件设计人员的能力，本节介绍用 PSpice 软件生成日辐射度的随机时间序列的方法。

在若干可用的方法中，参考文献［9.3］提供的方法更容易实现。假定用一阶自回归随机过程模型描述晴朗指数 k_h。k_h是地平面太阳辐照度与外层空间辐照度的比值。

模型可写成为

$$u(i)=\rho u(i-1)+\varepsilon \tag{9-34}$$

$u(i)$是第 i 天晴朗度指数与月均值的差值；ε 是在 -1 和 $+1$ 之间的高斯随机数；ρ 为自相关系数，假设为 0.25 且与地理位置无关[9.3]。

我们将使用这些概念直观地说明本节中追求高可靠性系统的研究案例。尤其在冬季，试图生成一月份 31 天辐照度的随机序列值（当然可以延长到更长的时间）。

首先运行 PSpice 文件（random_gen.cir），以便产生 31 个随机数序列。利用当地日辐照度均值和高斯分布的容差 15% 进行蒙特卡罗分析。所使用的文件如下：

```
*random_gen.cir
g1 0 1 value={1}
r1 1 0 resist 1
.model resist res (r=1 dev/gauss 15%)
vaux 2 0 dc 1
.dc vaux 0 1 0.1
.mc 31 dc v(1) ymax list seed=9321 output all
.probe
.print dc v(1)
.end
```

其中，数值为 1 的 g－源并联了一个标称值为 1Ω、容差为 15% 的电阻。为了执行蒙特卡罗程序，并在 .out 文件中产生随机数，运行虚拟的 DC 分析程序。随机数减去 1 以便使其分布在 $-1\sim1$ 之间，见表 9-4。然后利用式（9-34）生成 31 天的辐射值表。

表 9-4　在容差为 15% 下由蒙特卡罗程序产生的随机数

0	−0.181	0.06	0.12	0.0002	0.038	0.091	0.163
−0.063	0.05	0.225	−0.157	−0.039	0.025	−0.356	0.099
−0.344	−0.19	−0.055	0.12	0.3	0.1	0.1	−0.161
0.12	−0.19	−0.192	−0.191	−0.151	−0.105	−0.099	

以上程序并未保证辐射的月均值就是标称值，所以还需将随机数乘以一个常数以保证辐射的月均值就是标称值。

我们开始编写一个子电路程序“hour_ rad_ bartoli. lib”，其中含有日辐射的随机值放在了电压源（v_random）中。当天的随机数写在另一个在附录 I 中、名称为 v_ n 的电压源中。

这些日辐射随机数放在持续 24h（对应的内部时间为 24μs）的 PWL 电压源中。在附录 K 中描述了下面程序，将日辐射的随机数转换为时辐射。这个程序不会生成如第 7 章中描述的合成时辐射序列，而是生成一个理论上日辐照度曲线，其时间积分值等于日辐射。我们期望更为精细的时辐射时间序列算法，参考文献［9.4］和［9.5］给出了几种算法，但是在缺少计算这些值的合适代码的情况下，在这里介绍的程序可以对 PV 系统的长时间仿真有帮助。在下一小节将给出这个程序的直观说明。

9.11.2 闪烁式照明系统的长时间仿真

基于前面讨论，下面对类似于如图 9-15 所示的系统进行仿真。PV 系统的设计参数如下：

$$I_{scM}=126\text{mA},\ V_{ocmr}=10.4\text{V},\ P_{maxr}=0.9828\text{W},$$

$$I_{mMr}=122.4\text{mA},\ V_{mMr}=8.32\text{V},\ N_s=16$$

蓄电池的参数如下：

电荷初态 = 50%，规格 = 24Wh，标称电压 = 6V

等效负载电流 $I_{equivalentload}=17.5\text{mA}$

考虑到微型 PV 系统的典型应用中，通常模块的额定值很可能是最优值，所以我们放宽了短路电流数值的限制。

使用这些数据编写与图 9-15 相对应的“flash_light. cir”文件，这个文件的源程序在附录 I 中。在附录 I 中，子电路“hour_rad_31_bartoli. lib”用于计算如附录 C 所述方程给出的时辐射值。文件中使用 *RC* 电路对仿真数据进行滤波，使得输出曲线平滑，也有助于仿真过程收敛。将滤波器的输出数据送入 PV 模块的模型“module_beh. lib”，其输出端与负载及蓄电池相连。因为本装置中需要全天候报警灯，所以使用等效直流负载替代 LED 的功率损耗。最后，在本例中我们认为冬季环境温度恒定为 5℃。

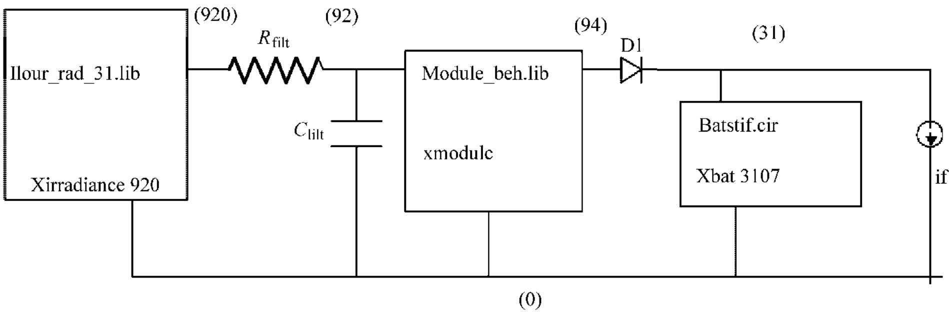


图 9-15　时辐射随机序列、模块和蓄电池的闪烁式照明电路

第一个仿真结果如图 9-16 所示。图中给出了在北纬 41.2°一月份的日辐射随机序列。在图中的每个步长相当于一天。

图 9-17 给出了将图 9-16 所示某地的日辐射值转换为一月份前 4 天的时辐射值。

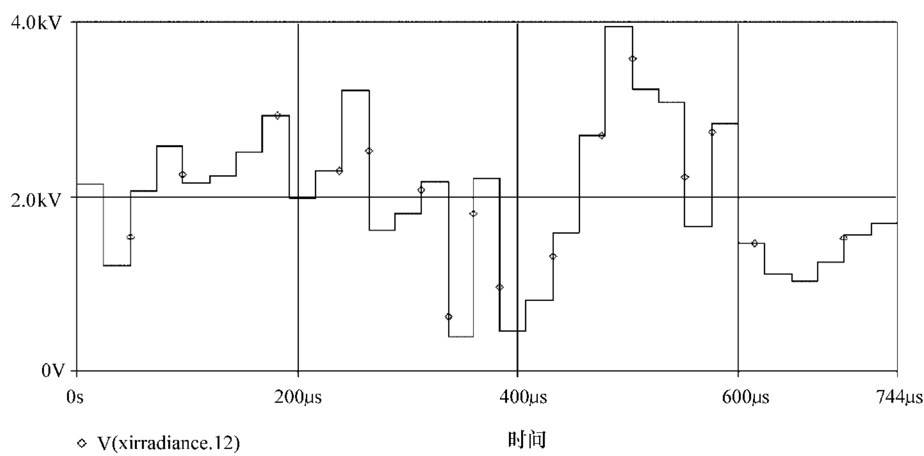


图 9-16 某地平均辐射值为 2000Wh/m² 每天，一月份 31 天的随机日辐射图

注：*y* 轴坐标值为 kWh/m² 每天；*x* 轴为以 h 为单位时间轴，起始时间为 0 结束时间为 744h，对应 31 天。

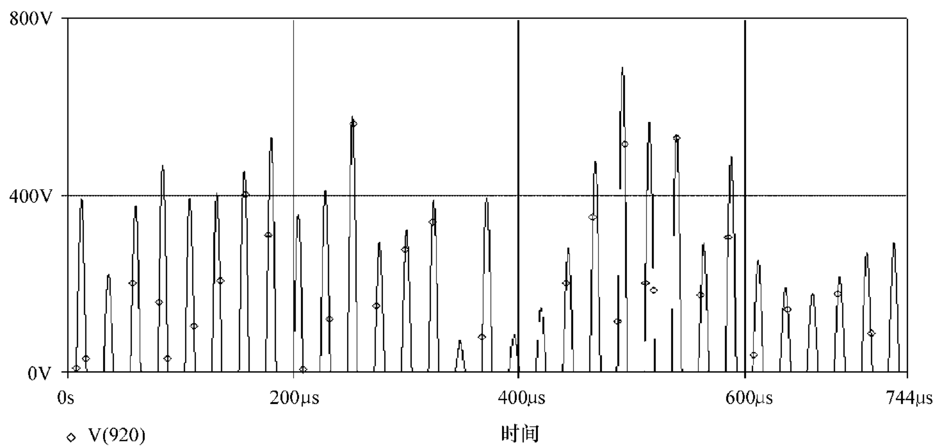


图 9-17 安装在北纬 41.2°水平接收器元月份 31 天所接收的全部辐射值

注：*x* 轴中的 1μs 对应实际 1h，当地日水平面平均辐射为 2000W/m²。

根据具体技术要求，日辐射平均值为 2000Wh/m² 每天。图 9-18 给出了两个随

时间变化的物理量，上图为 PV 板输出电流波形，下图为蓄电池 SOC 的波形。

可以看出，在最糟糕的一月份，即使蓄电池的初始 SOC 为标称容量的 90%，这个系统也不能保持在蓄电池的荷电状态在其限制的范围内。本结果给出的提示是如果使用更大初始容量的蓄电池，则能够提高系统的可靠性。依据商用电池的规格，我们下一步应该选用 6V，6Ah 的电池，其容量为 36Wh。依据仿真结果，我们发现图 9-19 所示的 SOC 在其限制范围以内。

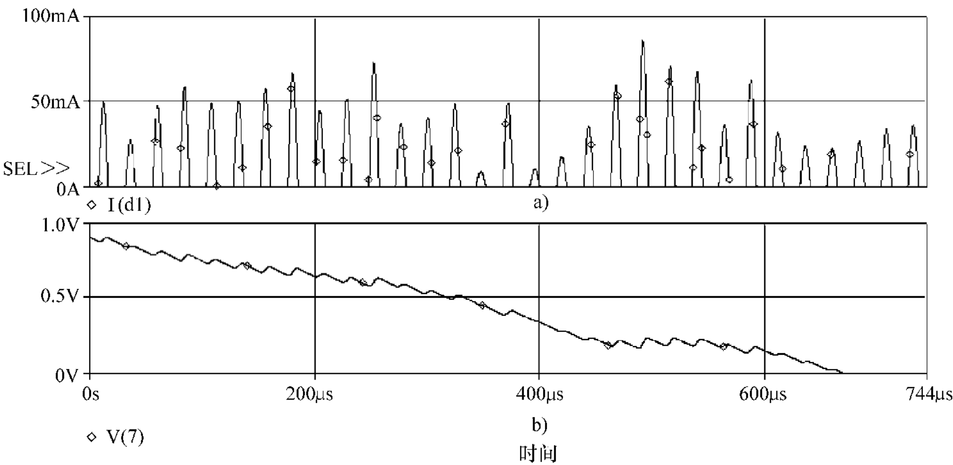


图 9-18　a）PV 板的输出电流；b）当地水平面日均辐射为 2000Wh/m^2 每天，在此条件下，一月份 31 天中蓄电池 SOC 的变化曲线，初值为 SOC = 0.9

注：时间轴的 1μs 对应实际 1h；SOC 无量纲。

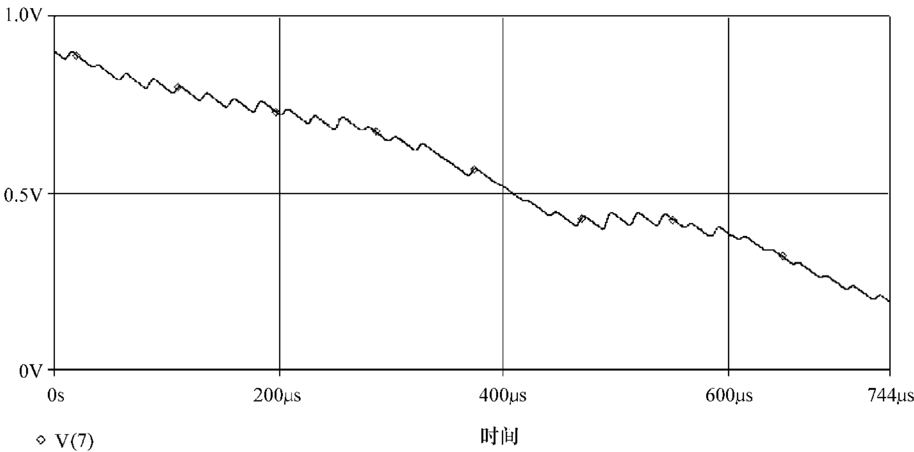


图 9-19　用 36Wh 的蓄电池替代图 9-18 中的 24Wh 蓄电池后 SOC 的变化曲线

注：图中的 1μs 表示 1h。

在这个例子中，程序还能够得到更精细的设计值，也允许考虑采用不同的随机数或不同的容差。值得注意的是完成图 9-18 所需的 CPU 时间约为 40s。

9.12 典型应用：路灯照明系统

在许多地区，路灯正在变为一个重要的议题，当地政府希望使用 PV 路灯。图 9-20 给出了一个范例。



图 9-20

太阳能路灯通常要考虑满足安全和照明的要求，具体技术如下：

1）光通量从 3000 到 5000lm。

2）在冬季夜晚能提供 8h 照明所需的足够能量，其等效损耗为 3.08A 和 12V。

一个可行的解决方案是 PV 系统提供 165W（peak）峰值的功率和使用 200Ah 的蓄电池。

本节与上节所用的时间序列是相同的，而差异在于地中海地区的一月份倾角为 30°的日平均辐射为 1734W/m^2 每天。附件 I 中给出“street _ light _ bartoli. cir”文件。

这个文件与图 9-15 所示电路非常相似，其差别是在附件 I 中提供了可以仿真温度特性的“temp_profile. lib”文件。图 9-21 所示的仿真结果给出了时辐射值、PV 电池的温度特性和蓄电池的 SOC 特性相对于时间的曲线。

可以看出，若蓄电池的标称容量为 2400Wh，即使在月初电池 SOC 是比较低的，这个参数也能保证 SOC 工作在限定的范围内。

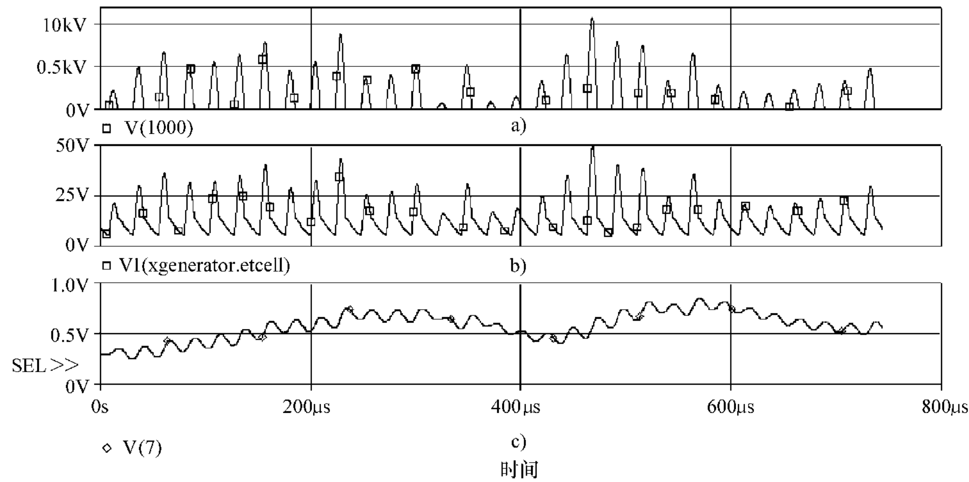


图 9-21　使用的 Bartoli 算法为路灯生成综合辐射时间序列

a）时辐射（W/m^2）　b）PV 电池的工作温度　c）电池 SOC

注：x 轴的 1μs 刻度对应于实际 1h。

9.13　习题

9.1　使用例 9.5 的方法和文件，对具有相同尺寸但是恒定负载电流值为 7μA 的系统进行仿真。增加单个 PV 电池的尺寸到 $0.7cm^2$ 再次仿真。

9.2　设计一个简单的灯光报警器，使用 2 串 3 并的 LED。每个 LED 工作的条件与 9.11 节相同。仿真设计结果并适当调整电池参数使得 SOC 在其规定的范围内。

9.3　在北纬 40°，辐射值为 $5kWh/m^2$ 每天的六月份，生成一个日辐射值的高斯型随机时间序列，容差为 10%。

参 考 文 献

[9.1] Ryer, A., *Light Measurement Handbook*, http://www.intl-light.com/handbook.

[9.2] *RS Electronic Components Catalogue, Edition* 2000.

[9.3] Bartoli, B., Coluzzi, B., Cuomo, V., Francesca, M. and Serio, C., 'Autocorelation of daily global solar radiation', *Nuovo Cimento*, **40**(2), 113–21, 1983.

[9.4] Graham, V.A. and Hollands, K.G.T., 'A method to generate synthetic hourly solar radiation globally', *Solar Energy*, **44**(6), 333–41, 1990.

[9.5] Aguiar, R. and Collares-Pereira, M., 'TAG: a time dependent autoregresive gaussian model for generating synthetic hourly radiation', *Solar Energy*, **49**(3), 167–74, 1992.

附　　录

附录 A　第 1 章用到的 PSpice 文件

表 A-1　第 1 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Learning. cir	PSpice 中的一阶电路	1. 3		1-4
Rc. lib	RC 电路子电路	1. 4		
Learining_subckt. cir	使用两个 RC 电路子电路	1. 4	rc. lib	
am15g. lib	（AM1. 5G） 子电路	1. 6		
am15g. cir	（AM1. 5G） 光谱的等效电路	1. 6	am15g. lib	1-7
wavelength. lib	微米波长的子电路	1. 7		
am0. lib	AM0 子电路	1. 7		
am0. cir		1. 7	Am0. Lib	1-9
black_ body. lib	黑体光谱子电路	1. 7		
black_ body. cir	任意光照度和温度的 PV 模块变换器	1. 8	black_ body. lib	1-9

```
*******************************************
*                                         *
*             LEARNING.CIR                *
*                                         *
*******************************************

* CIRCUIT TO LEARN ABOUT PSPICE
* COMPRISES A RESISTOR AND A CAPACITOR

* NODES
*    (0) GROUND
*    (1) INPUT
*    (2) OUTPUT

* COMPONENTS
* RESISTOR SYNTAX: rxx node_a node_b value
r1 1 2 1K; resistor between node (1) and node (2) value 1KOhm
```

```
* CAPACITOR SYNTAX : cxx node_a node_b value
c1 2 0 1n; capacitor btween node (2) and node (0) value 1nF

*INPUT

* SYNTAX FOR A PULSE VOLTAGE SOURCE:
*   vxx node+ node- pulse ( initial_value pulse_value delay risetime
*     falltime pulse_length, period)
v1 1 0 pulse (0 5 0 1u 1u 10u 20u)

*ANALYSIS TYPE
* SYNTAX FOR TRANSIENT ANALYSIS: .tran tstep tstop tstart tmax
* tstep: printing increment
* tstop: final simulation time
* tstart: (optional) start of printing time
* tmax:( optional) maximum step size of the internal time step

.tran 0 40u

*OUTPUT
.probe; starts the post processing of the data
.plot tran v(1) v(2); plots the transients
.end; ends the file


*******************************************
*                                         *
*              AM15G.LIB                  *
*                                         *
*******************************************

* AM1.5G 37°tilt angle, global spectral irradiance
* (modified trapezoidal integration)
* Total irradiance 962.5W/m2
* from Hulstrom, R., Bird, R., Riordan,C., Solar Cells, vol. 15, pp. 365-391, (1985)

* NODES
*   (11) spectral irradiance in (W/m2micron)
*   (12) reference

.subckt am15g 11 10
v_am15g 11 10 pwl
+   0.295u   0
+   0.305u   9.2
+   0.315u   103.9
+   0.325u   237.9
+   0.335u   376
+   0.345u   423
+   0.350u   466.2
+   0.360u   501.4
+   0.370u   642.1
+   0.380u   686.7
+   0.390u   694.6
+   0.400u   976.4
+   0.410u   1116.2
+   0.420u   1141.1
+   0.430u   1033
+   0.440u   1254.8
+   0.450u   1470.7
+   0.460u   1541.6
+   0.470u   1523.7
+   0.480u   1569.3
```

```
+    0.490u   1483.4
+    0.500u   1492.6
+    0.510u   1529
+    0.520u   1431
+    0.530u   1515.4
+    0.540u   1494.5
+    0.550u   1504.9
+    0.570u   1447.1
+    0.590u   1344.9
+    0.610u   1431.5
+    0.630u   1382.1
+    0.650u   1368.4
+    0.670u   1341.8
+    0.690u   1089
+    0.710u   1269.0
+    0.718u   973.7
+    0.724u   1005.4
+    0.740u   1167.3
+    0.753u   1150.6
+    0.758u   1132.9
+    0.763u   619.8
+    0.768u   993.3
+    0.780u   1090.1
+    0.8u     1042.4
+    0.816u   818.4
+    0.824u   765.5
+    0.832u   883.2
+    0.84u    925.1
+    0.86u    943.4
+    0.88u    899.4
+    0.905u   721.4
+    0.915u   643.3
+    0.925u   665.3
+    0.93u    389
+    0.937u   248.9
+    0.948u   302.2
+    0.965u   507.7
+    0.980u   623
+    0.994u   719.7
+    1.040u   665.5
+    1.070u   614.4
+    1.1u     397.6
+    1.12u    98.1
+    1.13u    182.2
+    1.137u   127.4
+    1.161u   326.7
+    1.18u    443.3
+    1.2u     408.2
+    1.235u   463.1
+    1.290u   398.1
+    1.32u    241.1
+    1.35u    31.3
+    1.395u   1.5
+    1.443u   53.7
+    1.463u   101.3
+    1.477u   101.7
+    1.497u   167.1
+    1.52u    253.1
+    1.539u   264.3
+    1.558u   265
+    1.578u   235.7
+    1.592u   238.4
```

```
+    1.61u    220.4
+    1.63u    2.35.6
+    1.646u   226.3
+    1.678u   212.5
+     1.740u   165.3
+    1.8u     29.2
+    1.86u    1.9
+    1.92u    1.2
+    1.96u    20.4
+    1.985u   87.8
+     2.005u  25.8
+    2.035u   95.9
+    2.065u   58.2
+     2.1u    85.9
+    2.148u   79.2
+    2.198u    68.9
+    2.27u    67.7
+    2.36u    59.8
+     2.45u   20.4
+    2.494u   17.8
+    2.537u   3.1
+    2.941u   4.2
+     2.973u  7.3
+     3.005u  6.3
+    3.056u   3.1
+    3.132u   5.2
+    3.156u   18.7
+     3.204u  1.3
+    3.245u   3.1
+    3.317u   12.6
+     3.344u  3.1
+    3.45u    12.8
+     3.573u  11.5
+    3.765u   9.4
+    4.045u   7.2

.ends am15g


******************************************
*                                        *
*              WAVELENGTH.LIB            *
*                                        *
******************************************

* NODES
*    (11) wavelength (micron) ( output)

*    (10) reference

.subckt wavelength 11 10
Vlambda 11 0 pwl 0.0001u         0.0001
+    0.1u     0.1
+    0.295u   0.295
+    0.305u   0.305
+    0.315u   0.315
+    0.325u   0.325
+    0.335u   0.335
+    0.345u   0.345
+    0.355u   0.355
+    0.365u   0.365
+    0.375u   0.375
```

```
+   0.385u   0.385
+   0.395u   0.395
+   0.405u   0.405
+   0.415u   0.415
+   0.425u   0.425
+   0.435u   0.435
+   0.445u   0.445
+   0.455u   0.455
+   0.465u   0.465
+   0.475u   0.475
+   0.485u   0.485
+   0.495u   0.495
+   0.505u   0.505
+   0.515u   0.515
+   0.525u   0.525
+   0.535u   0.535
+   0.545u   0.545
+   0.555u   0.555
+   0.565u   0.565
+   0.575u   0.575
+   0.585u   0.585
+   0.595u   0.595
+   0.605u   0.605
+   0.615u   0.615
+   0.625u   0.625
+   0.635u   0.635
+   0.645u   0.645
+   0.655u   0.655
+   0.665u   0.665
+   0.675u   0.675
+   0.685u   0.685
+   0.695u   0.695
+   0.6983u  0.6983
+   0.7u     0.7
+   0.71u    0.71
+   0.72u    0.72
+   0.7277u  0.7277
+   0.73u    0.73
+   0.74u    0.74
+   0.75u    0.75
+   0.7621u  0.7621
+   0.77u    0.77
+   0.78u    0.78
+   0.79u    0.79
+   0.8u     0.8
+   0.8059u  0.8059
+   0.825u   0.825
+   0.83u    0.83
+   0.835u   0.835
+   0.8465u  0.8465
+   0.86u    0.86
+   0.87u    0.87
+   0.875u   0.875
+   0.8875u  0.8875
+   0.9u     0.9
+   0.9075u  0.9075
+   0.915u   0.915
+   0.925u   0.925
+   0.93u    0.93
+   0.94u    0.94
+   0.95u    0.95
+   0.955u   0.955
```

```
+    0.966u   0.966
+    0.975u   0.975
+    0.985u   0.985
+    1.018u   1.018
+    1.082u   1.082
+    1.094u   1.094
+    1.098u   1.098
+    1.101u   1.101
+    1.128u   1.128
+    1.131u   1.131
+    1.144u   1.144
+    1.178u   1.178
+    1.264u   1.264
+    2u       2
+    4u       4

.ends wavelength

*******************************************
*                                         *
*              AM0.LIB                    *
*                                         *
*******************************************

* AM0 spectral irradiance
*
* Total irradiance 1353 W/m2
* from M.P.Thekaekara, A.J. Drummond, D.G. Murcray, P.R.Gast,
* E.G.Laue and R.C Wilson, 'Solar Electromagnetic radiation'
* NASA SP 8005, (1971).

* NODES

*    (11) spectral irradiance in (W/m2micron)
*    (12) reference


.subckt am0 11 10
v_am0 11 10 pwl 0.120u    .1
+    0.14u    0.03
+    0.15u    0.07
+    0.16u    0.23
+    0.17u    0.63
+    0.18u    1.25
+    0.19u    2.71
+    0.2u     10.7
+    0.21u    22.9
+    0.22u    57.5
+    0.23u    66.7
+    0.24u    68
+    0.25u    70.4
+    0.26u    180
+    0.27u    232
+    0.28u    222
+    0.29u    482
+    0.295u   584
+    0.3u     514
+    0.305u   603
+    0.310u   689
+    0.315u   764
+    0.32u    830
+    0.325u   975
```

```
+   0.33u    1059
+   0.335u   1081
+   0.34u    1074
+   0.345u   1069
+   0.35u    1093
+   0.355u   1083
+   0.360u   1068
+   0.365u   1132
+   0.370u   1181
+   0.375u   1157
+   0.38u    1120
+   0.385u   1098
+   0.390u   1098
+   0.395u   1089
+   0.4u     1429
+   0.405u   1644
+   0.415u   1774
+   0.425u   1693
+   0.435u   1663
+   0.445u   1922
+   0.455u   2057
+   0.465u   2048
+   0.475u   2044
+   0.485u   1976
+   0.495u   1960
+   0.505u   1920
+   0.515u   1833
+   0.525u   1852
+   0.535u   1818
+   0.545u   1754
+   0.555u   1720
+   0.565u   1705
+   0.575u   1719
+   0.585u   1712
+   0.595u   1682
+   0.605u   1647
+   0.61u    1635
+   0.62u    1602
+   0.63u    1570
+   0.64u    1544
+   0.65u    1511
+   0.66u    1486
+   0.67u    1456
+   0.68u    1427
+   0.69u    1402
+   0.7u     1369
+   0.71u    1344
+   0.72u    1314
+   0.73u    1290
+   0.74u    1260
+   0.75u    1235
+   0.76u    1211
+   0.77u    1185
+   0.78u    1159
+   0.79u    1134
+   0.8u     1109
+   0.81u    1013
+   0.82u    1060
+   0.83u    1036
+   0.84u    1013
+   0.85u    990
+   0.86u    968
```

```
+    0.87u    947
+    0.88u    925
+    0.89u    908
+    0.9u     891
+    0.91u    880
+    0.92u    869
+    0.93u    858
+    0.94u    847
+    0.95u    837
+    0.96u    820
+    0.97u    803
+    0.98u    785
+    0.99u    767
+    1u       748
+    1.05u    668
+    1.1u     593
+    1.15u    535
+    1.2u     485
+    1.25u    438
+    1.3u     397
+    1.35u    358
+    1.4u     337
+    1.45u    312
+    1.5u     288
+    1.6u     245
+    1.65u    223
+    1.7u     202
+    1.75u    180
+    1.8u     159
+    1.85u    142
+    1.9u     126
+    1.95u    114
+    2u       103
+    2.1u     90
+    2.2u     79
+    2.3u     69
+    2.4u     62
+    2.5u     55
+    2.6u     48
+    2.7u     43
+    2.8u     39
+    2.9u     35
+    3u       31
+    3.1u     26
+    3.2u     22
+    3.3u     19.2
+    3.4u     16.6
+    3.5u     14.6
+    3.6u     13.5
+    3.7u     12.3
+    3.8u     11.1
+    3.9u     10.3
+    4u       9.5
+    4.1u     8.7
+    4.2u     7.8
+    4.3u     7.1
+    4.4u     6.5
+    4.5u     5.9
+    4.6u     5.3
+    4.7u     4.8
+    4.8u     4.5
+    4.9u     4.1
```

```
+    5u        3.83
+    6u        1.75
+    7u        0.99
+    8u        0.60
+    9u        0.380
+    10u       0.250
+    11u       0.170
+    12u       0.120
+    13u       0.087
+    14u       0.055
+    15u       0.049
+    16u       0.038
+    17u       0.031
+    18u       0.024
+    19u       0.02
+    20u       0.016
+    25u       0.0061
+    30u       0.003
+    35u       0.0016
+    40u       0.00094
+    50u       0.00038
+    60u       0.00019
+    80u       0.00007
+    100u      0.00003

.ends am0


********************************************
*                                          *
*               AM0.CIR                    *
*                                          *
********************************************

* NODES

*    (11) AM0 irradiance in (W/m2micron)
*    (0) reference

xam0 11 0 am0
r1 11 0 1
.include am0.lib

.tran 0.1u 4u
.probe
.plot tran v(11)
.end
```

附录 B　第 2 章用到的 PSpice 文件

表 B-1　第 2 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Silicon_ abs. lib	硅的吸收系数	2. 3. 1		2-4
Jsc. lib	计算光谱短路电流，总短路电流，量子效率和光谱响应的子电路	2. 3. 2		2-5
Jsc_ silicon. cir	使用 jsc. lib 计算相所给的参数相同量级文件	2. 3. 2 例 2. 1 例 2. 2 例 2. 3 例 2. 4	am15g. lib wavelength. lib silicon_ abs. lib jsc. lib	2-7 2-8 2-9 2-10
Cell_ 1_ si. cir	绘制硅太阳电池的伏安特性曲线	2. 9 例 2. 5		2-12
Cell_ 1_ gaas. cir	绘制砷化镓太阳电池的伏安特性曲线	2. 9 例 2. 6		2-13

```
*****************************************
*                                       *
*            SILICON_ABS.LIB            *
*                                       *
*****************************************

* ABSORTION COEFFICIENT FOR SILICON
* DATA TAKEN FROM PC1D LIBRARY
*

* NODES

*   (11) ABSORPTION COEFFICIENT (1/CM)
*   (10) REFERENCE

.subckt silicon_abs 11 10
Vabs_si 11 10 pwl     0.295u     1.890E+06
+   0.305u   1.545E+06
+   0.315u   2.080E+06
+   0.325u   1.875E+06
+   0.335u   1.155E+06
+   0.345u   1.100E+06
+   0.355u   1.060E+06
+   0.365u   8.860E+05
+   0.375u   5.070E+05
+   0.385u   2.260E+05
+   0.395u   1.385E+05
+   0.405u   9.250E+04
+   0.415u   6.765E+04
+   0.425u   5.180E+04
```

```
+    0.435u   4.165E+04
+    0.445u   3.380E+04
+    0.455u   2.800E+04
+    0.465u   2.360E+04
+    0.475u   2.000E+04
+    0.485u   1.705E+04
+    0.495u   1.485E+04
+    0.505u   1.280E+04
+    0.515u   1.100E+04
+    0.525u   9.735E+03
+    0.535u   8.865E+03
+    0.545u   7.600E+03
+    0.555u   6.775E+03
+    0.565u   6.195E+03
+    0.575u   5.685E+03
+    0.585u   5.100E+03
+    0.595u   4.585E+03
+    0.605u   4.245E+03
+    0.615u   3.955E+03
+    0.625u   3.685E+03
+    0.635u   3.145E+03
+    0.645u   3.150E+03
+    0.655u   2.895E+03
+    0.665u   2.650E+03
+    0.675u   2.435E+03
+    0.685u   2.255E+03
+    0.695u   2.085E+03
+    0.6983u  1.930E+03
+    0.7u     2.000E+03
+    0.71u    1.860E+03
+    0.72u    1.710E+03
+    0.7277u  1.400E+03
+    0.73u    1.580E+03
+    0.74u    1.460E+03
+    0.75u    1.340E+03
+    0.7621u  1.234E+03
+    0.77u    1.133E+03
+    0.78u    1.039E+03
+    0.79u    9.510E+02
+    0.8u     8.690E+02
+    0.8059u  8.300E+02
+    0.825u   6.880E+02
+    0.83u    6.550E+02
+    0.835u   6.245E+02
+    0.8465u  5.535E+02
+    0.86u    4.830E+02
+    0.87u    4.340E+02
+    0.875u   4.115E+02
+    0.8875u  3.890E+02
+    0.9u     3.080E+02
+    0.9075u  2.720E+02
+    0.915u   2.555E+02
+    0.925u   2.240E+02
+    0.93u    2.090E+02
+    0.94u    1.820E+02
+    0.95u    1.570E+02
+    0.955u   1.455E+02
+    0.966u   1.240E+02
+    0.975u   1.040E+02
+    0.985u   8.705E+01
+    1.018u   3.990E+01
+    1.082u   6.200E+00
+    1.094u   4.700E+00
+    1.098u   3.500E+00
+    1.101u   3.500E+00
+    1.128u   2.000E+00
+    1.131u   1.5
+    1.144u   0.68
+    1.178u   0.065
+    1.264u   0
```

```
.ends sl1lcon_abs

*******************************************
*                                         *
*               JSC.LIB                   *
*                                         *
*******************************************

*    SUBCIRCUIT CALCULATING THE ANALYTICAL SOLAR CELL MODEL FOR SPECTRAL
*    SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY, TOTAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY AND
*    QUANTUM EFFICIENCY AND SPECTRAL RESPONSE

*NODES
*(200) REFERENCE
*(201) INPUT,  WAVELENGTH IN MICRON
*(202) INPUT, ABSORPTION COEFFICIENT IN 1/CM
*(203) INPUT, SPECTRAL IRRADIANCE IN W/M2MICRON
*(204) INPUT, REFLECTION COEFFICIENT
*(205) OUTPUT, EMITTER SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY ( A/CM2MICRON)
*(206) OUTPUT, BASE SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY(A/CM2MICRON)
*(207) OUTPUT, TOTAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY(A/CM2)
*(208) OUTPUT, TOTAL INTERNAL QUANTUM EFFICIENCY(%)
*(209) OUTPUT, TOTAL INTERNAL SPECTRAL RESPONSE(A/W)

*NORMALIZATION FACTOR TO 1000W/M2. 1000/962.5

******* subcircuit
.subckt jsc 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 PARAMS:we=1,lp=1,dp=1,se=1,
+ wb=1, ln=1, dn=1, sb=1
.param q=1.6e-19

**emitter component

egeom3 230 200 value={1.6e-19*v(202)*v(203)*(1000/962.5)*v(201)*(1e16/19.8)*
+ lp*(1-V(204))/(v(202)*lp+1)}
egeom0 231 200 value={cosh(we/lp)+se*(lp/dp)*sinh(we/lp)}
egeom1 232 200 value={se*(lp/dp)*cosh(we/lp)+sinh(we/lp)}
egeom2 233 200 value={se*(lp/dp)+v(202)*lp-exp(-v(202)*we)*v(232)}
ejsce 205 200 value={v(230)/(v(202)*lp-1)*(-v(202)*lp*
+ exp(-v(202)*we)+v(233)/v(231))};short circuit
eqee 234 200 value={v(205)*19.8/(q*v(203)*(1000/962.5)*
+ (1-V(204))*v(201)*1e16)};quantum efficiency

**base component

egeom30 240 200 value={cosh(wb/ln)+sb*ln/dn*sinh(wb/ln)}
egeom31 241 200 value={sb*ln/dn*(cosh(wb/ln)-exp(-v(202)*wb))}
egeom32 242 200 value={sinh(wb/ln)+v(202)*ln*exp(-v(202)*wb)}
egeom33 243 200 value={q*v(202)*v(203)*v(201)*1e16/19.8*1000/962.5*
+ (1-v(204))*ln*exp(-we*v(202))/((ln*v(202))^2-1)}
ejscb 206 200 value={v(243)*(v(202)*ln-(v(241)+v(242))/v(240))};short circuit
eqeb 244 200 value={v(206)*19.8/(q*v(203)*(1000/962.5)*(1-v(204))*v(201)*1e16)}
******* total short circuit current
ejsc 207 200 value={1e6*sdt(v(205)+v(206))}
eqe 208 200 value={(v(234)+v(244))*100}; total quantum efficiency in %
******* quantum efficiency
esr 209 200 value={(v(234)+v(244))*0.808*v(201)}

.ends jsc
```

附录 C　第 3 章用到的 PSpice 文件

表 C-1　第 3 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
cell_ 1. lib	太阳电池的一级子电路	3. 2		
cell_ 1. cir	绘制一级的电流电压波形图	3. 2	cell_ 1. lib	3-3
irradiance. cir	光照的影响	3. 2、3. 4、3. 5	cell_ 1. lib	3-4、3-5 表3-1、3-2、3-3、3-4
cell_ 2. lib	包含两个串联二极管和并联电阻的二级子电路	3. 7		
cell_ 2. cir	绘制二级模型子电路的电流电压波形图	3. 7	cell_ 2. lib	3-8 表 3-5
example3_ 3. cir	串联电阻值的影响	3. 7	cell_ 2. lib	3-8
shunt. cir	并联电阻的影响	3. 10	cell_ 2. lib	3-9
diode_ rec. cir	结二极管的影响	3. 11	cell_ 2. lib	3-10
cell_ 3. lib	温度的影响	3. 12		
temp. cir	温度的影响	3. 12	cell_ 3. lib	3-11
cell_ 4. lib	寄生二极管温度效应和短路温度系数	3. 12		表 3-6
temp_ 2. cir	显示温度效应	3. 12 例 3. 5	cell_ 4. lib	3-12
cell_ 5. lib	空间辐射效应	3. 13		
space. cir	空间辐射效应	例 3. 6	cell_ 5. lib	3-13
cell_ beh. lib	行为模式	3. 14		
cell_ beh. cir	行为电路	3. 14 例 3. 7	Cell _ beh. lib	3-15
cell_ pwl. cir	分段线性光源	3. 15	Cell_ beh. lib	3-16

```
*****************************************
*                                       *
*            EXAMPLE3_3.CIR             *
*                                       *
*****************************************

*   EFFECT OF THE SERIES RESISTANCE
*   NODES

*   (0) REFERENCE
*   (31) OUTPUT
*   (32) IRRADIANCE (W/M2)

.include cell_2.lib
xcell2 0 31 32 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs={RS} rsh=1000
.param RS=1
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.step param RS list 1e-4 1e-3 2e-3 5e-3 1e-2 2e-2 5e-2 1e-1
.probe
.end

*****************************************
*                                       *
*            SHUNT.CIR                  *
*                                       *
*****************************************

*   EFFECT OF THE SHUNT RESISTANCE
*   NODES

*   (0) REFERENCE
*   (31) OUTPUT
*   (32) IRRADIANCE (W/M2)

.include cell_2.lib
xcell2 0 31 32 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=1e-6 rsh={RSH}
.param RSH=1
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.step param RSH list 10000 1000 100 10 1 0.1
.probe
.end

*****************************************
*                                       *
*            DIODE_REC.CIR              *
*                                       *
*****************************************

*   EFFECT OF THE RECOMBINATION DIODE
*   NODES

*   (0) REFERENCE
*   (31) OUTPUT
*   (32) IRRADIANCE (W/M2)
```

```
.include cell_2.lib
xcell2 0 31 32 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02={J02}
+ jsc=0.0343 rs=1e-6 rsh=1000
.param J02=1
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.step param J02 list 1e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4
.probe
.end

*******************************************
*                                         *
*              CELL_3.LIB                 *
*                                         *
*******************************************

*    MODEL LEVEL 3
*    INCLUDES THE EXTRAPOLATED
*    TO 0K BANDGAP VALUE FOR SILICON FOR THE
*    TEMPERATURE MODEL, EG=1.17 FOR TEMPERATURE ANALYSIS
*    TWO DIODES (DIFFUSION,D1 AND RECOMBINATION,D2)
*    CURRENT SOURCE
*    SERIES RESISTANCE   RS
*    SHUNT RESISTANCE    RSH
*    BUILT-IN SPICE DIODE MODEL D
*    NODES
*    (300)REFERENCE
*    (301)INTERNAL NODE
*    (302)INPUT, IRRADIANCE
*    (303) OUTPUT
.subckt cell_3 300 303 302 params:area=1, j0=1, jsc=1, j02=1, rs=1, rsh=1

girrad 300 301 value={(jsc/1000)*v(302)*area}
d1 301 300 diode
.model diode d(is={j0*area},eg=1.17)
d2 301 300 diode2
.model diode2 d(is={j02*area}, n=2)
rs 301 303 {rs}
rsh 301 300 {rsh}
.ends cell_3

*******************************************
*                                         *
*              CELL_5.LIB                 *
*                                         *
*******************************************

*    MODEL LEVEL 5
*    SPACE RADIATION DEGRADATION MODEL
*    STANDARD AM0 IRRADIANCE 1353 W/m2
*    SINGLE DIODE (DIFFUSION,D1)
*    CURRENT SOURCE
*    SERIES RESISTANCE   RS IS INTERNALLY CALCULATED
*    BUILT-IN SPICE DIODE MODEL D
*    INPUT PARAMETERS: AREA,CELL TEMPERATURE,BOL DATA,FLUENCE
*    DEGRADATON CONSTANTS FOR CURRENT AND VOLTAGE

*    NODES
*    (300)REFERENCE
*    (301)INTERNAL NODE
```

```
*    (302)INPUT, IRRADIANCE
*    (303) OUTPUT

.subckt cell_5 300 303 302 params:area=1, temp=1, jscbol=1, pmaxbol=1, vocbol=1, f=1
+ ki=1, fi=1, kv=1, fv=1
girrad 300 301 value={(jscbol-ki*log10(1+(f/fi)))/1353*v(302)*(area)}
d1 301 300 diode
.model diode d(is={(jscbol-ki*log10(1+(f/fi)))*area*exp(-(vocbol-kv*log10
+(1+f/fv))
+ /(8.66e-5*(temp+273)))})
.func uvet() {8.66e-5*(temp+273)}
.func vocnorm() {vocbol/uvet}
.func rs() {vocbol/(jscbol*area)- pmaxbol*(1+vocnorm)/(jscbol**2*area*(vocnorm-
+ log((vocnorm)+0.72)))}
rs 301 303 {rs()}
.ends cell_5

*******************************************
*                                         *
*              SPACE.CIR                  *
*                                         *
*******************************************

*    EFFECT OF THE SPACE RADIATION
*    NODES

*    (0) REFERENCE
*    (31) OUTPUT
*    (32) IRRADIANCE (W/M2)

.include cell_5.lib
xcell5 0 31 32 cell_5 params:area=8 temp=27 jscbol=0.0436
+ pmaxbol=0.0208 vocbol=0.608 f={F}
+ ki=5.26E-3 fi=3.02e13 kv=0.042 fv=2.99e12
vbias 31 0 dc 0
.param F=1

virrad 32 0 dc 1353; One sun AM0

.plot dc i(vbias)
.probe
.dc vbias 0 0.6 0.01
.step param F list 1e10 1e11 1e12 1e13 1e14 1e15 1e16
.end

*******************************************
*                                         *
*              CELL_BEH.LIB               *
*                                         *
*******************************************

*    BEHAVIOURAL MODEL OF A SOLAR CELL

*    INPUT PARAMETERS:AREA,AM1.5 JSCR,AM1.5 VOCR,AM1.5 PMAXR
*    AM1.5 VMR,AM1.5 IMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*    NOCT, REFERENCE TEMPERATURE

*    NODES
*    (300)     REFERENCE
*    (301) INTERNAL NODE
*    (302) INPUT, IRRADIANCE
*    (303)     INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*    (304) OUTPUT
```

```
*    (305)     OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*    IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*    (306)     OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*    (307) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*    (308) OUTPUT, MPP CURRENT
*    (309) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.subckt cell_beh 300 302 303 304 305 306 307 308 309 params: area=1,
+ jscr=1, coef_jsc=1, vocr=1, coef_voc=1,pmaxr=1,
+ noct=1,jmr=1 , vmr=1, tr=1
girrad 300 301 value={v(302)/1000*(jscr*area+coef_jsc*area*(v(307)-25))}
eisc 305 300 value={v(302)/1000*(jscr*area+coef_jsc*area*(v(307)-25))}
evoc 306 300 value={if (v(305)>1e-11, vocr+coef_voc*(v(307)-25)+8.66e-5*
+ (v(307)+273)*log(v(305)/(area*jscr)),0)}
etcell 307 300 value={v(303)+(noct-20)/800*v(302)}

gidiode 301 300 value={area*v(305)/(exp(v(306)/(8.66e-5*(v(307)+273)))-1)*
+ (exp(v(301)/ (8.66e-5*(v(307)+273)))-1)}
rs 301 304 {vocr/(jscr*area)-pmaxr/(jscr**2*area*(vocr/0.0258-log
+ ((vocr/0.0258)+0.72))/(1+vocr/0.0258))}
.func frs() {vocr/(jscr*area)-pmaxr/(jscr**2*area*(vocr/0.0258-log
+ ((vocr/0.0258)+0.72))/(1+vocr/0.0258))}

gim 300 308 value={jmr*area*v(302)/1000+coef_jsc*area*(v(303)-25)}
rim 308 300 1
evm 309 300 value={8.66e-5*(v(307)+273)*log(1+(v(305)-v(308))/v(305)*(exp(v(306)/
+ (8.66e-5*(v(307)+273)))-1))-v(308)*frs}
.ends cell_beh

******************************************
*                                        *
*              CELL_BEH.CIR              *
*                                        *
******************************************

*    USING BEHAVIOURAL MODEL OF THE SOLAR CELL
*    NODES
*    (0)       REFERENCE
*    (32) INPUT, IRRADIANCE
*    (33)      INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*    (34) OUTPUT
*    (35)      OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*    IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*    (36)      OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*    (37) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*    (38) OUTPUT, MPP CURRENT
*    (39) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.include cell_beh.lib
xcellbeh 0 32 33 34 35 36 37 38 39 cell_beh params:area=1, tr=25, jscr=0.0375,
+ pmaxr=0.0184, vocr=0.669, jmr=35.52e-3, vmr=0.518, noct=47,
+ coef_jsc=12.5e-6, coef_voc=-3.1e-3

virrad 32 0 dc 500
vtemp 33 0 dc 25
vbias 34 0 dc 0

rim 38 0 1

.option stepgmin
.plot dc i(vbias)
.probe
.dc vbias 0 0.7 0.001

.end
```

附录 D　第 4 章用到的 PSpice 文件

表　第 4 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
series. cir	2 个串联太阳电池的伏安特性曲线	4. 2. 1	cell_2. lib	4-2、4-3、4-4
bypass. cir	12 个带有旁路二极管的串联太阳电池的伏安特性曲线	4. 2. 3 例 4. 1	cell_2. lib	4-6、4-7
Shunt2. cir	2 个并联太阳电池的伏安特性曲线	4. 3	cell_2. lib	4-8
example4_ 2. cir	并联太阳电池的阴影遮盖影响（情况 A）	例 4. 2	cell_2. lib	4-9
example4_ 2b. cir	并联太阳电池的阴影遮盖影响（情况 B）	例 4. 2	cell_2. lib	4-9
module_1. lib	PV 模块子电路	4. 4		4-10
module_1. cir	可绘制伏安特性曲线的 PV 模块电路	4. 4、4. 7	module_ 1. lib	4-11、4-15
module_ conv. cir	任意光照和温度的 PV 模块变换器	4. 5. 1 例 4. 3	module_ 1. lib	
module_beh. lib	PV 模块的行为模型	4. 6		4-13
module_beh. cir	使用行为模型计算伏安特性曲线	4. 6	module_ beh. lib	4-14
6x3_ array. cir	PV 模块串并联阵列	4. 8	cell_2. lib	
shadow. cir	与 6x3_ array. cir 相同的部分电池被遮蔽	例 4. 5		4-16、4-17
generator_ beh. lib	串并联 PV 模块发电机模型	4. 9		4-19
generator_ beh. cir	仿真发电机的伏安特性曲线的电路文件	4. 9	Generator_ beh. lib	

```
****************************************
*                                      *
*             BYPASS.CIR               *
*                                      *
****************************************

*    INCLUDES 12 SOLAR CELLS IN SERIES AND A BYPASS DIODE
*    ACROSS SOLAR CELL NUMBER 6
.include cell_2.lib

xcell1 45 43 42 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell2 47 45 44 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000

xcell3 49 47 46 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell4 51 49 48 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell5 53 51 50 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell6 55 53 52 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell7 57 55 54 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000

xcell8 59 57 56 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell9 61 59 58 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell10 63 61 60 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell11 65 63 62 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000
xcell12 0 65 64 cell_2 params:area=126.6 j0=1e-11 j02=1E-9
+ jsc=0.0343 rs=1e-3 rsh=100000

vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 45 dc 1000
virrad2 44 47 dc 1000
virrad3 46 49 dc 1000
virrad4 48 51 dc 1000
virrad5 50 53 dc 1000
virrad6 52 55 dc 0
virrad7 54 57 dc 1000
virrad8 56 59 dc 1000
virrad9 58 61 dc 1000
virrad10 60 63 dc 1000
virrad11 62 65 dc 1000
virrad12 64 0 dc 1000

*bypass diode
dbypass 55 53 diode
.model diode d

.dc vbias 0 8 0.01
.probe
.plot dc i(vbias)
.end
```

```
*******************************************
*                                         *
*             EXAMPLE4_2.CIR              *
*                                         *
*******************************************

*   TWO SOLAR CELLS IN PARALLEL SAME IRRADIANCE
*   NODES
*   (0) REFERENCE
*   (43) OUTPUT

.include cell_2.lib
xcell1 0 43 42 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.5 rsh=100
xcell2 0 43 44 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.5 rsh=100
vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 0 dc 500
virrad2 44 0 dc 500
.plot dc i(vbias)
.dc vbias 0 0.6 0.01
.probe
.end
*******************************************
*                                         *
*             EXAMPLE4_2B.CIR             *
*                                         *
*******************************************

*   TWO SOLAR CELLS IN PARALLEL ONE SHADOWED
*   NODES

*   (0) REFERENCE
*   (43) OUTPUT

.include cell_2.lib
xcell1 0 43 42 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.5 rsh=100
xcell2 0 43 44 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.5 rsh=100

vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 0 dc 1000
virrad2 44 0 dc 0
.plot dc i(vbias)

.dc vbias 0 0.6 0.01
.probe
.end

*******************************************
*                                         *
*             MODULE_CONV.CIR             *
*                                         *
*******************************************

*IMPLENTS THE IRRADIANCE-TEMPERATURE CONVERSION METHOD
* BASED ON Dv
*   NODES
*   (0)REFERENCE
```

```
*   (42)INPUT, IRRADIANCE
*   (43) BIAS
*   (44) CIRCUIT OUTPUT


.include module_1.lib
xmodule 0 43 42 module_1 params:ta=25,tr=25, iscmr=5, pmaxmr=85, vocmr=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
vbias 43 0 dc 0
virrad 42 0 dc 800

*CONVERSION EQUATIONS
.param vocmr=22.3
.param tr=25
.param ta=25
edv 43 44 value={vocmr*(0.06*log(1000/v(42))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(42))}
.dc vbias 0 23 0.1
.probe
.end
*******************************************
*                                         *
*              MODULE_BEH.LIB             *
*                                         *
*******************************************

*BEHAVIOURAL MODEL OF A PV MODULE
*   INPUT PARAMETERS:AREA,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
*   AM1.5 VMMR,AM1.5 IMMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*   NOCT, REFERENCE TEMPERATURE


*   NODES
*   (400)    REFERENCE
*   (401) INTERNAL NODE
*   (402) INPUT, IRRADIANCE
*   (403)    INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*   (404) OUTPUT
*   (405)    OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*   IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*   (406)    OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*   (407) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*   (408) OUTPUT, MPP CURRENT
*   (409) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.subckt module_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, np=1

girrad 400 401 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}

eisc 405 400 value={v(402)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}
evoc 406 400 value={if (v(405)>1e-11, vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*
+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr)),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(402)}

gidiode 401 400 value={v(405)/(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)}
rsm 401 404 {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))}
.func frsm() {vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))}
```

```
gim 400 408 value={immr*v(402)/1000+coef_iscm*(v(403)-25)}
rimm 408 400 1
evmm 409 400 value={if (v(402)>0.001, ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408))/v(405)*(exp(v(406)/
+ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsm,0)}
.ends module_beh

*******************************************
*                                         *
*              6X3_ARRAY.CIR              *
*                                         *
*******************************************

*    INCLUDES 18 SOLAR CELLS ( SERIES ASSOCIATION OF 6 SETS OF 3 PARALLEL EACH)
*    AND ABYPASS DIODES
*    NODES

*    (0) REFERENCE
*    (41) OUTPUT
.include cell_2.lib

xcell1 43 41 42 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell2 43 41 44 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000

xcell3 43 41 46 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell4 45 43 48 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell5 45 43 50 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell6 45 43 52 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell7 47 45 54 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000

xcell8 47 45 56 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell9 47 45 58 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell10 49 47 60 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell11 49 47 62 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell12 49 47 64 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell13 51 49 66 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell14 51 49 68 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell15 51 49 70 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell16 0 51 72 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell17 0 51 74 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell18 0 51 76 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000

vbias 41 0 dc 0
virrad1 42 43 dc 1000
```

```
virrad2 44 43 dc 1000
virrad3 46 43 dc 1000
virrad4 48 45 dc 1000
virrad5 50 45 dc 1000
virrad6 52 45 dc 1000
virrad7 54 47 dc 1000
virrad8 56 47 dc 1000
virrad9 58 47 dc 1000
virrad10 60 49 dc 1000
virrad11 62 49 dc 1000
virrad12 64 49 dc 1000
virrad13 66 49 dc 1000
virrad14 68 49 dc 1000
virrad15 70 49 dc 1000
virrad16 72 49 dc 1000
virrad17 74 49 dc 1000
virrad18 76 49 dc 1000

*bypass diodes
d1 43 41 diode
d2 45 43 diode
d3 47 45 diode
d4 49 47 diode
d5 51 49 diode
d6 0 51 diode
.model diode d(is=1e-6 , n=1)


.dc vbias -1 4 0.01
.probe
.plot dc i(vbias)
.end

******************************************
*                                        *
*              SHADOW.CIR                *
*                                        *
******************************************

*   INCLUDES 18 SOLAR CELLS ( SERIES ASSOCIATION OF 6 SETS OF 3 PARALLEL EACH)
*   AND ABYPASS DIODES
*   NODES

*   (0) REFERENCE
*   (41) OUTPUT
*   SOLAR CELLS NUMBER 1,2,3,5,6,9,17 AND 18 SHADOWED
.include cell_2.lib

xcell1 43 41 42 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell2 43 41 44 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000

xcell3 43 41 46 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell4 45 43 48 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell5 45 43 50 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell6 45 43 52 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell7 47 45 54 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
```

```
xcell8 47 45 56 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell9 47 45 58 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell10 49 47 60 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell11 49 47 62 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell12 49 47 64 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell13 51 49 66 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell14 51 49 68 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell15 51 49 70 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell16 0 51 72 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell17 0 51 74 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000
xcell18 0 51 76 cell_2 params:area=8 j0=1e-11 j02=0
+ jsc=0.0343 rs=0.1 rsh=1000


vbias 41 0 dc 0
virrad1 42 43 dc 0
virrad2 44 43 dc 0
virrad3 46 43 dc 0
virrad4 48 45 dc 1000
virrad5 50 45 dc 0
virrad6 52 45 dc 0
virrad7 54 47 dc 1000
virrad8 56 47 dc 1000
virrad9 58 47 dc 0
virrad10 60 49 dc 1000
virrad11 62 49 dc 1000
virrad12 64 49 dc 1000
virrad13 66 49 dc 1000
virrad14 68 49 dc 1000
virrad15 70 49 dc 1000
virrad16 72 49 dc 1000
virrad17 74 49 dc 0
virrad18 76 49 dc 0


*bypass diodes
d1 43 41 diode
d2 45 43 diode
d3 47 45 diode
d4 49 47 diode
d5 51 49 diode
d6 0 51 diode
.model diode d(is=1e-6 , n=1)


.dc vbias -1 4 0.01
.probe
.plot dc i(vbias)
.end
```

```
******************************************
*                                        *
*           GENERATOR_BEH.LIB            *
*                                        *
******************************************

*   BEHAVIOURAL MODEL OF A PV GENERATOR
*   INPUT PARAMETERS:,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
*   AM1.5 VMMR,AM1.5 IMMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*   NOCT, REFERENCE TEMPERATURE

*   NODES
*   (400)   REFERENCE
*   (401) INTERNAL NODE
*   (402) INPUT, IRRADIANCE
*   (403)   INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*   (404) OUTPUT
*   (405)   OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*   IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*   (406)   OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*   (407) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*   (408) OUTPUT, MPP CURRENT
*   (409) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.subckt generator_beh 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, nsg=1 npg=1

ev402 410 400 value={if (v(402)>0.1, v(402),0.1)}
girrad 400 401 value={v(410)/1000*(npg*iscmr+npg*coef_iscm*(v(407)-25))}

eiscm 405 400 value={v(410)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}
evocm 406 400 value={if (v(405)>1e-11, (vocmr+coef_vocm*(v(407)-25)+8.66e-5*
+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr))),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(410)}

gidiode 401 400 value={npg*v(405)/(exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/ (ns*nsg*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)}
rsg 401 404 {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))))}
.func frsg() {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258)))))}

gimg 400 408 value={npg*(immr*v(410)/1000+coef_iscm*(v(403)-25))}
rimg 408 400 1
evmg 409 400 value={if (v(410)>0.1, nsg*(ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
v(408)/npg)/v(405)*(exp(v(406)/
+ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsg/nsg),0)}
.ends generator_beh

******************************************
*                                        *
*           GENERATOR_BEH.CIR            *
*                                        *
******************************************

*   BEHAVIOURAL MODEL OF A PV GENERATOR
*   INPUT PARAMETERS:,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
*   AM1.5 VMMR,AM1.5 IMMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*   NOCT, REFERENCE TEMPERATURE
```

```
*    NODES
*    (0)        REFERENCE
*    (41) INTERNAL NODE
*    (42) INPUT, IRRADIANCE
*    (43)       INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*    (44) OUTPUT
*    (45)       OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*    IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*    (46)       OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*    (47) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*    (48) OUTPUT, MPP CURRENT
*    (49) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.include generator_beh.lib
xgenerator 0 42 43 44 45 46 47 48 49 generator_beh params:
+ iscmr=0.37, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=5,
+ noct=47,immr=0.32 , vmmr=15.6, tr=25, ns=33, nsg=2 npg=5
.param irrad=1
vbias 44 0 dc 0
virrad 42 0 dc {irrad}
vtemp 43 0 dc 0
.dc vbias 0 50 1
.step param irrad list 10 100 400 1000
.probe
.end
```

附录 E　第 5 章用到的 PSpice 文件

表 E-1　第 5 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Water_ pump_ t	PV 阵列串联直流电动机离心	5. 2. 4	Pump. lib	5-3、5-4、5-5
transient. cir	泵系统的 PSpice 仿真			
Bat. cir	铅酸电池模型	5. 3. 2		5-11
Example 5. 3. cir	一个幅度 20A 频率 1kHz 的正弦电流源给电池充电时电池电压和荷电状态的变化	例 5. 3	Bat. cir	5-12、5-13、5-14
7TSE. cir	ATERSA 公司型号为 7TSE 70 电池模型的改进与子电路表	5. 3. 3 例 5. 4		
Example 5. 5. cir	独立的 PV 系统仿真 负载和 PV 发电机电流源	5. 3. 4 例 5. 5	Bat. cir exportmed 3v. s + 1 exportmedI. s + 1	5-11、5-16、5-17、5-18、5-19
Example 5. 6. cir	独立的 PV 系统仿真负载为阻性负载	5. 3. 4 例 5. 6	Module_ 1. lib Bat. cir Irrad2d. stl	5-6、5-20、5-21、5-22、5-23、5-24
Batstd. cir	简化 PSpice 电池模型	5. 3. 5		5-25

```
*******************************************
*                                         *
*           Example 5.6 Netlist           *
*                                         *
*******************************************

* NODES
* (0) Reference
* (1) Irradiance profile input
* (3) PV modules output & Battery ( positive) & Load
* (7) Battery SOC ( %)
.inc module_1.lib
xmodule_1    0    3    1    module_1    params:    iscmr=5,
+ vocmr=22.3,ns=36,np=1,nd=1,pmaxmr=85, ta=20,tr=1
xbat1 3 0 7 bat params: ns=6, SOCm=576, k=.7, D=1e-3, SOC1=0.85
.inc bat.cir
R1 3 0 4
.inc irrad2d.stl
vmesur 1 0 stimulus Vgg
.tran 1s 120000s 0.1s
.probe
.end
```

附录 F　第 6 章用到的 PSpice 文件

表 F-1　第 6 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Example 6. 1. cir	具有电池并联调节独立 PV 系统	6. 3. 1 例 6. 1	module_ 1. lib bat. cir opamp. lib irrad. stl	6-3、6-4、6-5、6-6、6-7、6-8
Example 6. 2. cir	具有串联调节控制的独立 PV 系统	6. 3. 1 例 6. 2 附录 F	module _ 1. lib batstd. cir opamp. lib irrad. stl	6-12、 6-13、6-14
dcdcf. cir	DC—DC 变换器模型	6. 4. 3		
ppm. cir	包含 DC—DC 变换器的独立模型（PV 发电机 + DC—DC + 负载）	6. 4. 3 例 6. 3 附录 F	generator_ beh. lib dcdcf. cir irrad. stl	6-19、6-20、6-21、6-22、6-23、6-24、6-25、6-26、6-27
Inverter1. cir	逆变器 PSpice 的模型	6. 51 例 6. 4 附录 F		6-33、6-34、6-35、6-36、6-37
Inverter2. cir	逆变器 PSpice 行为模型	6. 5. 2		6-38、6-39、6-40
Example 6. 5. cir	逆变器仿真	6. 5. 2 例 6. 5	Generator_ beh. lib Irradprueba2. stl Inverter2. cir	6-41、6-42、6-43、6-44、6-45、6-46
Example 6. 6. cir	直接与电池连接的逆变器模型	6. 5. 3 例 6. 6		
Moduleppt. cir	简易 PV 发电机模型	6. 5. 3 例 6. 7		
Example 6. 7. cir	交流输出的独立 PV 系统，包括 PV 发电机，DC—DC 变换器，电池，逆变器和负载	6. 5. 3 例 6. 7	Moduleppt. cir April. stl Dcdcf. cir Batstdif. cir Inverter3. cir	6-47、6-48、6-49、6-50、6-51、6-52

```
*****************************************
*                                       *
*          Example 6.2.cir              *
*                                       *
*****************************************

* module, charge regulator and battery connection
* NODES
* (0) Refernece
* (1) Irradiance profile input
* (3) PV modules output
* (4) Battery ( positive terminal )
* (7) Battery SOC (%)
* (8) (12) A.O. inputs
* (13) (14) A.O. polarization
* (10) A.O. output

xmodule    0    3    1    module_1    params:    iscmr=5,    tr=25,
+vocmr=22.3,ns=36,np=1,nd=1,pmaxmr=85, ta=25
.inc module_1.lib
.inc irrad.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
xbat1 4 0 7 batstd params: ns=6, SOCm=1000, k=.8, D=1e-5, SOC1=.45
.inc batstd.cir
Rbat 4 0 800
R1 4 8 10000
R2 8 0 10000
x741 12 8 13 14 10 ad741
.inc opamp.lib
Vcc 13 0 dc 15
Vee 14 0 dc -15
vref 16 0 dc 6.8
R6 12 16 4100
R7 12 100 220000
Wch 3 4 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-5, ion=10e-6, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
vcurrent 10 100 dc 0
.tran 1s 140000s
.probe
.end

*****************************************
*                                       *
*          ppm.cir                      *
*                                       *
*****************************************

* NODES
* (0) Reference
* (2) Temperature profile input
* (1) Irradiance profile input
* (3) PV modules output & dc-dc converter input
* (40) dc-dc converter output & Load connection

.inc generator_beh.lib
xgen 0 1 2 3 405 406 407 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.9 , vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=1, npg=1
vtemp 2 0 dc 25
.inc irrad.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
.inc dcdcf.cir
```

```
xconv 0 3 20 30 40 dcdcf params: n =1, vol=12
Rload 40 0 5
.tran 1s 20000s
.probe
.end


******************************************
*                                        *
*            inverter1.cir               *
*                                        *
******************************************


vindc   2  0   24v
q1      2  9     6   q2n3055
d1      6  2   diode
r1      9  7   4
vb1     7  6   pulse 0 14  0 1ps 1ps 9.9ms 20ms

q2      2  1   3    q2n3055
d2      3  2   diode
r2     12  1   4

vb2 12  3 pulse 0  14  10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

q3   6    11  0    q2n3055
r3  11    13  4
d3   0     6   diode
vb3  13    0   pulse 0 14 10ms 1ps 1ps 9.9ms 20ms

q4   3     4   0   q2n3055
d4   0     3   diode
r4   8     4    4
vb4  8     0    pulse 0 14  0 1ps 1ps 9.9ms 20ms

r    6   5   4
c   10   5   199uf
l    3  10   50.92mh
.model diode d( tt=1e-6)
.model q2n3055 npn
.tran  1ms  1
.four  50hz  12 i(r)  v(6,3)
.options abstol=0.5ma reltol=0.01 vntol=0.001v
.probe
.end

******************************************
*                                        *
*            Batstdif.cir                *
*                                        *
******************************************

*   NODES
*   (1)       SOC
*   (2)       Battery V+
*   (3)       Battery V-

.subckt batstdif 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch  4 2 Value={(2+(0.16*v(1)))*ns}
evdch  5 2 value={(1.926+(0.248*v(1)))*ns}
rserie 8 88 {rs}
```

```
.fun rs() {(0.7+(0.1/(abs(SOC1-0.2)))*ns*162/SOCm}
ebat 88 2  value={IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}
vcurrent 3 8 dc 0
eqt 13 2 value={SOC1+1e6*(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 2 value={limit (v(13), 0 , 1)}
evcalculsoc 9 2 value={(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOm*v(13)/3600)}
ecoch 10 2 value={IF (i(vcurrent)>0, v(4), v(5))}
.ends batstdif
```

附录 G　第 7 章用到的 PSpice 文件

表 G-1　第 7 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
irrad_ jan_ 16. lib	一天每小时辐射能数据	7. 2 例 7. 1		
irrad_ jan_ 16. cir	绘制每小时辐射能值曲线	7. 2	irrad_ jan_ 16. lib	7-2
psh. cir	举例说明 PSH 概念		irrad_ jan_ 16. lib temp_ jan_ 16. lib module_ beh. lib	
mismatch. cir	日能量均衡	7. 4 例 7. 4	irrad_ jan_ 16. lib temp_ jan_ 16. lib module_ beh. lib	7-5
nightload. cir	有夜间负载的日常能量均衡	7. 4. 2	irrad_ jan_ 16. lib temp_ jan_ 16. lib module_ beh. lib	7-6
dayload. cir	有日间负载的日常能量均衡	7. 4. 3	irrad_ jan_ 16. lib temp_ jan_ 16. lib module_ beh. lib	7-7
monthly_ radia tion. lib	每月的辐射能值	7. 5		
Seasonal. cir	能量平衡			
madrid. stl	随机日辐射能时间序列	7. 7 例 7. 6		7-10 7-11
madrid. cir	绘制马德里地区的辐射能序列	7. 7 例 7. 6	cell_ 2. lib	7-10 7-11
generation. lib	LLP 计算的发生脉冲	例 7. 7		7-13
aux_ gen. lib	LLP 计算的辅助能量发生	例 7. 7		7-13
cons. lib	LLP 计算的负载脉冲	例 7. 7		
llp. cir	计算 LLP	例 7. 7		7-17 7-18 7-19
(*) vbatapril. stl	测量电池电压值	例 7. 8		
(*) imodapril. stl	测量 PV 电流输出	例 7. 8		
(*) load. stl	测量负载曲线	例 7. 8		7-20
(*) irrad. stl	测量辐照度曲线	例 7. 8		7-21

（续）

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Stand_alone. cir	比较测量值和仿真	7. 9	Irrad. stl	7-22
			Iload. stl	7-23
			Imodapril. stl	7-24
			Vbatapril. stl	
Madrid_hour. stl	一年内每小时随机辐射值	7. 10	Batstd. cir	
Madrid_temp. stl	一年内的环境温度			
Generator_beh_2. lib				
Stand_alone_Madrid. cir			Madrid_hour. stl	7-26
			Madrid_temp. stl	7-27
			Generator_beh_2. lib	7-28
			Batstdif. cir	
Pump_quasi_steady. lib	水泵模型	7. 11		
Water_pump. cir	水泵系统的长期仿真	7. 11 例 7. 9	Pump_quasi_steady. lib	7-29

（*）见网络。

```
*******************************************
*                                         *
*            TEMP_JAN_16.LIB              *
*                                         *
*******************************************

.subckt temp_jan_16 13 10

vtemp 13 10 pwl  0u 8.72,1u 7.99,2u 7.32,3u 6.73,4u 6.24,5u 5.86
+6u 5.62,7u 5.50,8u 5.72,9u 6.76,10u 8.46,11u 10.43,12u  12.25
+13u 13.53,14u 14,15u 13.92,16u  13.72,17u 13.38,18u 12.92,19u 12.35
+20u 11.70,21u  10.99,22u 10.23,23u 9.46,24u 8.70

.ends temp_jan_16


*******************************************
*                                         *
*            NIGHTLOAD.CIR                *
*                                         *
*******************************************

*
*  NODES
*  (0)   REFERENCE
*  (72) INPUT, IRRADIANCE
*  (73)   INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*  (74) OUTPUT
*  (75)   OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*  IRRADIANCE AND TEMPERATURE
```

```
* (76)  OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
* (77) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
* (78) OUTPUT, MPP CURRENT
* (79) OUTPUT, MPP VOLTAGE
* (80) LOAD
.include irrad_jan_16.lib
.include temp_jan_16.lib
.include module_beh.lib
xtemp 73 0 temp_jan_16
xirrad 72 0 irrad_jan_16

xmodule 0 72 73 74 75 76 77 78 79 module_beh params: iscmr=5,coef_iscm=9.94e-6,
+vocmr=22.3, coef_vocm=-0.0828, pmaxmr=85,noct=47,immr=4.726, vmmr=17.89, tr=25,
+ns=36, np=1

vbat 74 0 dc 12
rload 80 0 3.263

sload 74 80 81 0 switch1
.model switch1 vswitch roff=1e8 ron=0.01 voff=0 von=5
vcontrols1 81 0 0 pulse (0,5,19u,0,0,4u,24u)

.tran 0.01u 24u 0 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end


*******************************************
*                                         *
*            DAYLOAD.CIR                  *
*                                         *
*******************************************

*
* NODES
* (0)   REFERENCE
* (72) INPUT, IRRADIANCE
* (73)   INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
* (74) OUTPUT
* (75)   OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
* IRRADIANCE AND TEMPERATURE
* (76)   OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
* (77) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
* (78) OUTPUT, MPP CURRENT
* (79) OUTPUT, MPP VOLTAGE
* (80) LOAD

.include irrad_jan_16.lib
.include temp_jan_16.lib
.include module_beh.lib
xtemp 73 0 temp_jan_16
xirrad 72 0 irrad_jan_16

xmodule 0 72 73 74 75 76 77 78 79 module_beh params: iscmr=5,coef_iscm=9.94e-6,
+vocmr=22.3, coef_vocm=-0.0828, pmaxmr=85,noct=47,immr=4.726, vmmr=17.89,
+tr=25, ns=36, np=1

vbat 74 0 dc 12
rload 80 0 6.528

sload 74 80 81 0 switch1
```

```
.model switch1 vswitch roff=1e8 ron=0.01 voff=0 von=5
vcontrols1 81 0 0 pulse (0,5,8u,0,0,8u,24u)

.tran 0.01u 24u 0 0.01u
.option stepgmin
.probe
.end


*******************************************
*                                         *
*            SEAONAL.CIR                  *
*                                         *
*******************************************

*NODES
*    (0) REFERENCE
*    (72)  INPUT, MONTHLY RADIATION  (KWH/M2_MONTH)
*    (74)  OUTPUT, MONTHLY GENERATION (KWH/M2_MONTH)
*    (75)  OUTPUT, MONTHLY CONSUMPTION (KWH/M2_MONTH)
*    (76) OUTPUT, TIME INTEGRAL OF THE GENERATION-CONSUMPTION
.include monthly_radiation.lib
.include monthly_gen_cons.lib
xradiation 72 0 monthly_radiation
xgen_cons 0 74 75 72 monthly_gen_cons params:eday=3000, nsg=2 , npg={NPG}, pmaxmr=85
.param NPG=4

eout 76 0 value={sdt(1e6*(v(74)-v(75)))}
.step param NPG list 3 4 5 6
.tran 0.1u 13u

.probe
.end


*******************************************
*                                         *
*            GENERATION.LIB               *
*                                         *
*******************************************


*      PROVIDES PULSE ( WIDE 0.2 UNITS OF TIME .HEIGHT 5* DAILY ENERGY)
*      TIME SERIES OF DAILY PV GENERATION
*      USED IN THE LLP.CIR FILE TO CALCULATE LOSS OF LOAD PROBABILITY

*      NODES
*      (700) REFERENCE
*      (730) OUTPUT, PV GENERATION PULSES
*      (731) INPUT, DAILY RADIATION VALUES
*      (740) OUTPUT, TIME INTEGRAL OF GENERATION (kWh)

.subckt generation 700 730 731 740 params: pmaxr=1, nsg=1, npg=1

sw1 731 720 711 700 switch
.model switch vswitch roff=1e8 ron=0.0001 voff=0 von=5
vctrl1 711 700 0 pulse (0,5,0,0,0,0.01u,1u)
csh 720 700 10u
sw2 720 700 721 700 switch
vctrl2 721 700 0 pulse (0,5,0.2u,0,0,0.01u,1u)
ggen 700 730 value={5*v(720)/1000*pmaxr/1000*nsg*npg}
egen_out 740 700 value={sdt(1e6*5*v(720)/1000*pmaxr/1000*nsg*npg)}
.ends generation
```

```
*****************************************
*                                       *
*            CONS.LIB                   *
*                                       *
*****************************************

*    PROVIDES PULSE ( WIDE 0.2 UNITS OF TIME .HEIGHT 5* DAILY ENERGY)
*    TIME SERIES OF DAILY LOAD
*    USED IN THE LLP.CIR FILE TO CALCULATE LOSS OF LOAD PROBABILITY

*    NODES
*    (700) REFERENCE
*    (730) OUTPUT, PV GENERATION PULSES
*    (731) INPUT, DAILY RADIATION VALUES
*    (770) OUTPUT, TIME INTEGRAL OF LOAD (kWh)
*    PARAMETERS
*                              EDAY= DAILY LOAD ( kwh_day)

.subckt CONS 700 730 770 params: eday=1

vcons 741 700 dc {5*eday}
sw1 741 743 742 700 switch
.model switch vswitch roff=1e8 ron=0.0001 voff=0 von=5
vctrl3 742 700 0 pulse (0,5,0.7u,0,0,0.2u,1u)
r740 743 700 1k
gcons 730 700 value={v(743)}
econs_out 770 700 value={sdt(1e6*v(743))}
.ends cons

*****************************************
*                                       *
*            AUX_GEN.LIB                *
*                                       *
*****************************************

*    PROVIDES PULSE ( WIDE VARIABLE .HEIGHT 100* DAILY ENERGY)
*    OF AUXILIARY GENERATOR DELIVERY ENERGY WHEN THE STORAGE IS LESS THAN
*    THE DAILY LOAD TO FILL-UP THE STORAGE
*    USED IN THE LLP.CIR FILE TO CALCULATE LOSS OF LOAD PROBABILITY

*    NODES
*    (700) REFERENCE
*    (730) OUTPUT, AUXILIARY GENERATION PULSES (CURRENT)
*    (731) INPUT, BATTERY ENERGY
*    (760) OUTPUT, TIME INTEGRAL OF AUXILIARY ENERGY (kWh)
*    PARAMETERS
*                             EDAY= DAILY LOAD ( kwh_day)
*                             EBAT= TOTAL SIZE OF STORAGE ( kWh)

.subckt aux_gen 700 730 731 760 params: eday=1 ebat=1

vaux 741 700 dc {100*eday}
sw1 741 743 742 700 switch
r743 743 700 1k
.model switch vswitch roff=1e10 ron=0.0001 voff=0 von=2
vctrl3 742 700 0 pulse (0,5,0.35u,0,0,0.1u,1u)

gaux 700 730 value={if (v(751)<-0.0010 & v(731)<ebat-0.2 & v(742)>0, v(743),0)}
eaux2 750 700 value={if( (v(731)-eday)<0, v(731)-eday, 0)}
sw4 750 751 752 700 switch
vctrl4 752 700 0 pulse ( 0,5,0.15u,0,0,0.05u,1u)
caux2 751 700 10u
sw5 751 700 753 700 switch
```

```
vctrl5 753 700 0 pulse( 0,5,0.6u,0,0,0.1u,1u)

eaux3 761 700 value={if (v(751)<-0.0010 & v(731)<ebat-0.2 & v(742)>0, v(743),0)}
eaux_out 760 700 value={sdt(v(761)*1e6)}
.ends aux_gen


*******************************************
*                                         *
*             LIP.CIR                     *
*                                         *
*******************************************


*    CALCULATES THE VALUE OF THE LOSS OF LOAD PROBABILITY
*    FROM THE DATA OF TOTAL ENERGY SIZE OF BATTERY, DAILY ENERGY
*    LOAD AND STOCHASTICALLY GENERATED DAILY RADIATION VALUES FOR ONE
*     YEAR


*    WARNING, INTERNAL TIME UNITS ARE MICROSECONDS
*    REAL TIME UNIT ARE DAYS
*    WARNING, TIME STEP SHOULD BE 0.01us FOR ACCURATE RESULTS
*    LEADING TO LONG SIMULATION TIME ( tipycally 12 minutes in a standard PC)
*    PARAMETERS EDAY= DAILY ENERGY LOAD (kWh_day)
*    EBAT= TOTAL ENERGY STORAGE SIZE OF BATTERY (kWh)


*    NODES
*    0    REFERENCE
*    71 OUTPUT, BATTERY ENERGY AT TIME T ( kWh)
*    73     INPUT, DAILY RADIATION VALUES (kWh/m2_day)
*    74 OUTPUT, TOTAL ENERGY PROVIDED BY AUXILIARY GENERATOR
*                                IN THE YEAR (kWh_year)
*    75 OUTPUT, TOTAL ENERGY CONSUMED IN THE YEAR (kWh_year)
*    76 OUTPUT, TOTAL ENERGY GENERATED BY THE PV GENERATOR


.include generation.lib
.include cons.lib
.include aux_gen.lib
.include radiation_1year.lib


xrad 0 73 radiation_1year
.param ebat=20
xgen 0 71 73 76 generation params: pmaxr=85,nsg=2, npg=5
xcons 0 71 75 cons params: eday=2

xaux_gen 0 71 71 74 aux_gen params:eday=2 ebat=20
cbat 71 0 1u
diode 71 72 diode
.model diode d
vmax 72 0 dc {ebat}
.tran 0.01u 365u 0.1u 0.001u
.option stepgmin reltol=0.001 vntol=1u abstol =1m gmin=1e-10
.IC v(71)=10
.probe
.end
```

```
*****************************************
*                                       *
*          GENERATOR_BEH_2.LIB          *
*                                       *
*****************************************


*    LEVEL 2 INCLUDING SMOOTHING DATA FILTER
*    BEHAVIOURAL MODEL OF A PV GENERATOR
*    INPUT PARAMETERS:,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
*     AM1.5 VMMR,AM1.5 IMMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*    NOCT, REFERENCE TEMPERATURE


*    NODES
*     (400)     REFERENCE
*    (401) INTERNAL NODE
*    (402) INPUT, IRRADIANCE
*    (403)     INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*    (404) OUTPUT
*    (405)     OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*    IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*    (406)     OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*    (407) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*    (408) OUTPUT, MPP CURRENT
*    (409) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.subckt generator_beh_2 400 402 403 404 405 406 407 408 409 params:
+ iscmr=1, coef_iscm=1, vocmr=1, coef_vocm=1,pmaxmr=1,
+ noct=1,immr=1 , vmmr=1, tr=1, ns=1, nsg=1 npg=1

ev402 411 400 value={v(402)+1}
rfilt 411 410 0.01
cfilt 410 400 1000p

girrad 400 401 value={v(410)/1000*(npg*iscmr+npg*coef_iscm*(v(407)-25))}

eiscm 405 400 value={v(410)/1000*(iscmr+coef_iscm*(v(407)-25))}
evocm 406 400 value={if (v(405)>1e-11 & v(410)>10, (vocmr+coef_vocm*
+(v(407)-25)+ns*8.66e-5*+ (v(407)+273)*log(v(405)/(iscmr))),0)}

etcell 407 400 value={v(403)+(noct-20)/800*v(410)}

gidiode 401 400 value={if (v(405)>1e-6 & v(406)>0.1,npg*v(405)/
+ (exp(v(406)/(ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1)*
+ (exp(v(401)/ (ns*nsg*8.66e-5*(v(407)+273)))-1),0)}



rsg 401 404 {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))))))}
.func frsg() {nsg/npg*((vocmr/(iscmr)-pmaxmr/(iscmr**2*(vocmr/(ns*0.0258)-log
+ ((vocmr/(ns*0.0258))+0.72))/(1+vocmr/(ns*0.0258))))))}


gimg 400 408 value={npg*(immr*v(410)/1000+coef_iscm*(v(403)-25))}
rimg 408 400 1
evmg 409 400 value={if (v(410)>1, nsg*(ns*8.66e-5*(v(407)+273)*log(1+(v(405)-
+v(408)/npg)/v(405)*(exp(v(406)/
+ (ns*8.66e-5*(v(407)+273)))-1))-v(408)*frsg/nsg),0)}
.ends generator_beh_2
```

```
*****************************************
*                                       *
*   STAND_ALONE_MADRID.CIR              *
*                                       *
*****************************************

*   BEHAVIOURAL MODEL OF A PV GENERATOR
*   INPUT PARAMETERS:,AM1.5 JSCMR,AM1.5 VOCMR,AM1.5 PMAXMR
*    AM1.5 VMMR,AM1.5 IMMR, CURRENT TEMP COEFF.,VOLTAGE TEMP.COEFF,
*   NOCT, REFERENCE TEMPERATURE

*   NODES
*    (0)    REFERENCE

*   (42) INPUT, IRRADIANCE
*   (43)     INPUT, AMBIENT TEMPERATURE
*   (44) OUTPUT
*   (45)     OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=SHORT CIRCUIT CURRENT(A) AT
*   IRRADIANCE AND TEMPERATURE
*   (46)     OUTPUT, OPEN CIRCUIT VOLTAGE AT IRRADIANCE ANDTEMPERATURE
*   (47) OUTPUT, (VOLTAGE) VALUE=CELL OPERATING TEMPERATURE(°C)
*   (48) OUTPUT, MPP CURRENT
*   (49) OUTPUT, MPP VOLTAGE

.include madrid_hour.stl
.include madrid_temp.stl
.include generator_beh_2.lib
.include batstdif.cir
xgenerator 0 42 43 44 45 46 47 48 49 generator_beh_2 params:
+ iscmr=5, coef_iscm=9.94e-6, vocmr=23, coef_vocm=-0.0828,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.726 , vmmr=17.89, tr=25, ns=36, nsg=2 npg=6

xbat 145 0 50 batstdif params: ns=12 SOCm=33975 k=0.8 D=1e-5, SOC1=0.9
d1 44 145 diode
.model diode d (is=1e-9)
iload 145 0 dc 5.2

econtrol_soc 7000 0 value={if (v(50)>0.95, 15, -1)}
r2 7000 7001 100
c2 7000 7001 1n
r1 145 7002 4
q1 7002 7001 0 q40240
.model q40240 npn (is=1e-9)

virrad 42 0 stimulus vmadrid_hour
vtemp 43 0 stimulus vtemp_madrid
.tran 1u 8000u 0u 1u
.options abstol=1 reltol=0.01 vntol=1 gmin=1e-6 itl4=350
.options stepgmin
.probe
.end

*****************************************
*                                       *
*           PUMP_QUASI_STEADY.LIB       *
*                                       *
*****************************************

*   NODES
*   (500) REFERENCE
*   (501) INPUT (VOLTAGE)
*   (570) OUTPUT ( FLOW) LITER/SECOND
***********
```

```
*    PARAMETERS RA:ARMATURE RESISTOR(OHM),LA: ARMATURE INDUCTANCE(H)
*    KM:MOTOR CONSTANT,RF: FIELD RESISTOR, LF:FIELD INDUCTANCE
*     A AND B CENTRIFUGAL PUMP TORQUE CONSTANTS
*    A1,B1 AND C1 PUMP CHARACTERISITIC CURVE CONSTANTS
*    H:HEAD(METER)
*pump_quasi_steady.lib
.subckt pump_quasi_steady 500 501 570 PARAMS: RA=1,KM=1,A=1,B=1
+    F=1, RF=1, A1=1, B1=1, C1=1, H=1

ra 501 503 {RA}

econ 503 504 value={{KM}*v(508)*v(507)}
rf 504 506 {RF}

vs 506 0 dc 0
gte 0 507 value={{KM}*v(508)*v(508)}
gtl 507 0 value = {A+B*v(507)*v(507)}
rdamping 507 0 {1/{F}}

d2 0 507 diode
.model diode d
gif 0 508 value={v(504)/{RF}}
rif 508 0 1

.IC v(507)=0

*** rpm= omega*(60/2/pi)
erpm 540 0 value={v(507)*60/6.28}
eflow 550 0 value={(-{B1}*v(540)-sqrt(({B1}^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*(A1*(v(540)^2)
+-{H})))/(2*{C1})}
eraiz 560 0 value ={({B1}^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*(A1*(v(540)^2)-{H})}
eflow2 570 0 value={if (v(560)>0, v(550),0)};checks the sign under the square root
.ends pump_quasi_steady

*******************************************
*                                         *
*            WATER_PUMP.CIR               *
*                                         *
*******************************************

*    NODES
*    (44) OUTPUT OF GENERATOR AND INPUT TO PUMP
*    (50) OUTPUT, WATER FLOW ( LITRE/SECOND)
*    (60) OUTPUT, TIME INTEGRAL OF WATER FLOW ( VOLUME, LITRE)
*    (42) INPUT, HOURLY RADIATION VALUES ( KWH/M2_DAY)
*    (43) INPUT, AMBIENT TEMPERATURE (°C)

.include madrid_hour.stl
.include madrid_temp.stl
.include generator_beh_2.lib
.include pump_quasi_steady.lib
xgenerator 0 42 43 44 45 46 47 48 49 generator_beh_2 params:
+ iscmr=5, coef_iscm=9.94e-6, vocmr=23, coef_vocm=-0.0828,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.726 , vmmr=17.89, tr=25, ns=36, nsg=10 npg=4

xpump 0 44 50 pump_quasi_steady params: RA=0.15,KM=0.37,A=0.0925,B=7.26e-6
+    F=0.00083, RF=0.15, A1=1.35e-6, B1=0.0015, C1=-3.32, H=11.5
virrad 42 0 stimulus vmadrid_hour
vtemp 43 0 stimulus vtemp_madrid
e_volume 60 0 value={sdt(v(50)*1e6*3600)}
.tran 1u 8000u 0u 1u
.options abstol=1 reltol=0.01 vntol=1 gmin=1e-6 itl4=350
.options stepgmin
.probe
.end
```

附录 H 第 8 章用到的 PSpice 文件

表 H-1 第 8 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Inverter7. cir	PV 并网系统逆变器模型	8. 4		8-2、8-3
Example 8. 1. cir	PV 并网系统仿真	8. 4 例 8. 1	generator_ beh. lib inverter7. cir grid. cir aprilmicro. stl	8-4、 8-5、 8-6、 8-7、 8-8、 8-9、 8-10
Acgenerator_be. lib	交流模块模型	8. 5	Generator_ beh. lib	8-11
ACgen. cir	交流模型仿真实例	8. 5 例 8. 2	Acgenerator_ be. lib grid. cir irrad2E. stl	8-11、8-12、 8-13
Inverter9. cir	具有直流输出电流的逆变器 PSpice 模型	8. 6		8-2
GCPV1. cir	逆变器的 PSpice 行为模型 使用 Inverter9. cir 仿真 PV 并网	8. 6	Generator_ beh. lib Inverter9. cir Mardrid1. stl MadridT1. stl	8-14、8-15、 8-16、8-17、 8-18
Example 8. 3. cir	中型 PV 并网系统设计实例	8. 6 例 8. 3	Generator_ beh. lib Irradmadrid. stl TempM. stl Inverter9. cir	8-19、8-20、 8-21
Example 8. 4. cir	小型 PV 并网系统设计实例	8. 6 例 8. 4	Generator_ beh. lib Irradmadrid. stl TempM. stl Inverter9. cir	8-23、8-24、 8-25、8-26、 8-27

```
*****************************************
*                                       *
*           EXAMPLE 8.1.CIR             *
*                                       *
*****************************************

*   NODES
*   (0) Reference
*   (1) Irradiance profile input
*   (3) PV generator output
*   (4) Inverter Input
*   (6) Inverter output
*   (20) PV generator current at the maximum power point
*   (30) PV generator voltage at the maximum power point
```

```
** PV generator
.include generator_beh.lib
xgenerator 0 1 43 3 45 46 47 20 30 generator_beh params:
+ iscmr=5.2, coef_iscm=0.13e-3, vocmr=21.2, coef_vocm=-0.1,pmaxmr=85,
+ noct=47,immr=4.9 , vmmr=17.3, tr=25, ns=36, nsg=2 npg=3

** Irradiance and temperature profiles
.inc aprilmicro.stl
vmesur 1 0 stimulus Virrad
vtemp 43 0 dc 12

** Blocking diode
d2 3 4 diode
.model diode d(n=1)

** inverter
.inc inverter7.cir
xinvert 4 0 6 20 30 inv params: nf=0.9

** grid
.inc grid.cir
xgr1 6 0 grid


.tran 1ms 0.14s 0 1u
.probe
.end
```

附录 I　第 9 章用到的 PSpice 文件

表 I-1　第 9 章用到的 PSpice 文件

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Cie. stl	人眼的 CIE 视觉响应	9. 5		9-1
Fluorescent_ rel. stl	标准化的荧光光谱密度	9. 5		9-3
Normalization. cir	计算 1lux 归一化常数	9. 5	Fluorescent_ rel. stl Cie. stl	9-4
Jsc_ art. lib	计算短路电流发库文件和方程	9-5		
Jsc_ silicon_ art. cir	在人造光源下计算短路电流	9. 5	silicon_ abs. lib fluorescent_ rel. stl wavelength. lib jsc_ art. lib	9-5
Illuminace _ am15g. cir	计算与 AM1. 5G 光谱下的照度	9. 7	Am15g. lib Cie. stl	
Irradiance_ art. cir	计算荧光灯的光通量	例 9. 3	Fluorescent_ rel. stl	
Irradiance_ eff. lib	计算人造光源和自然光源混合光的有效照度	9. 8		
Montecarlo. cir	计算一个太阳能 PV 模块的随机蒙特卡洛的伏安特性	9. 8	Irradiance_ eff. lib Moduel_ beh. lib	9-6 9-7 9-8
Pocket _ calcula-tor. cir	仿真太阳能计算器电路	9. 9	Module – beh. lib	9-10、 9-11
Random_ gen. cir	用于计算随机数	9. 11. 1		
Irrad_ h_ 31. lib	随机日常辐射发生器	9. 11. 1		9-16
Hour _ rad _ 31 _ bartoli. lib	一个月中每小时辐射值	9. 11. 2		9-17
Flash_ light. cir	仿真一个闪光灯电路	9. 11. 2	Hour_ rad_ 31_ bartoli. lib Generator_ beh. lib Batstdif. cir	9-18 9-19

（续）

文件名称	内容描述	章节	包含	图表
Street_ light_ bartoli. cir	仿真街道灯光	9. 12	Hour_ rad_ 31_ bartoli. lib Generator_ beh. lib Temp_ profile. lib Batstdif. cir	9-20
Temp_ profile. lib	给定时间的温度值发生器	附录 L		

```
*******************************************
*                                         *
*            CIE.STL                      *
*                                         *
*******************************************
*   CIE PHOTOPIC EYE RESPONSIVITY
*   NORMALIZED TO A MAXIMUM OF 1 AT 555NM AS A FUNCTION OF
    THE WAVELENGTH IN MICRON
.stimulus vcie pwl
+0.380u 0.000039
+ 0.39u 0.00012
+ 0.4u 0.000396
+ 0.41u 0.00121
+ 0.42u 0.004
+ 0.43u 0.0116
+ 0.44u 0.023
+ 0.45u 0.038
+ 0.46u 0.06
+ 0.47u 0.09098
+ 0.48u 0.13902
+ 0.49u 0.20802
+ 0.5u 0.323
+ 0.507u 0.44431
+ 0.51u 0.503
+ 0.52u 0.71
+ 0.53u 0.862
+ 0.54u 0.954
+ 0.55u 0.99495
+ 0.555u 1
+ 0.56u 0.995
+ 0.57u 0.952
+ 0.58u 0.870
+ 0.59u 0.757
+ 0.6u 0.631
+ 0.61u 0.503
+ 0.62u 0.381
+ 0.63u 0.265
+ 0.64u 0.175
+ 0.65u 0.107
+ 0.66u 0.061
+ 0.67u 0.032
```

```
+ 0.68u 0.0107
+ 0.69u 0.00821
+ 0.7u 0.004102
+ 0.71u 0.002091
+ 0.72u 0.001047
+ 0.73u 0.00052
+ 0.74u 0.000249
+ 0.75u 0.00012
+ 0.76u 0.00006
+ 0.77u 0.00003

*****************************************
*                                       *
*          FLUORESCENT_REL.STL          *
*                                       *
*****************************************

*   RELATIVE SPECTRAL IRRADIANCE OF A FLUORESCENT LAMP
*   WAVELENGTH IN MICRON AND VALUE IN RELATIVE NORMALIZED
*   TO A MAXIMUM VALUE OF 1

.stimulus vfluorescent_rel pwl

+   0u           0.00000
+   3.4e-1u      0.00001
+   3.5e-1u      6e-3
+   3.81E-01u    7.22E-02
+   3.85e-01u    9.11e-02
+   3.90e-01u    1.01e-01
+   3.95e-01u    1.29e-01
+   4.01e-01u    1.51e-01
+   4.011e-01u   4.43e-01
+   4.10e-01u    4.43e-01
+   4.101e-01u   1.92e-01
+   4.15e-01u    2.23e-01
+   4.19e-01u    2.48e-01
+   4.22e-01u    2.70e-01
+   4.27e-01u    2.92e-01
+   4.32e-01u    3.11e-01
+   4.322e-01u   10e-01
+   4.42e-01u    10e-01
+   4.43e-01u    3.77e-01
+   4.46e-01u    3.96e-01
+   4.49e-01u    4.11e-01
+   4.57e-01u    0.427
+   4.64e-01u    0.443
+   4.71e-01u    0.455
+   4.78e-01u    0.46
+   4.84e-01u    0.44
+   4.91e-01u    0.44
+   4.99e-01u    0.427
+   5.03e-01u    0.411
+   5.07e-01u    0.396
+   5.13e-01u    0.380
+   5.23e-01u    0.380
+   5.32e-01u    0.389
+   5.41e-01u    0.405
+   5.411e-01u   0.772
+   5.52e-01u    0.772
+   5.521e-01u   0.465
+   5.57e-01u    0.49
+   5.63e-01u    0.518
```

```
+   5.69e-01u   0.543
+   5.75e-01u   0.562
+   5.76e-01u   0.584
+   5.84e-01u   0.584
+   5.841e-01u  0.546
+   5.92e-01u   0.515
+   5.99e-01u   0.465
+   6.05e-01u   0.411
+   6.12e-01u   0.361
+   6.18e-01u   0.311
+   6.28e-01u   0.261
+   6.34e-01u   0.22
+   6.39e-01u   0.195
+   6.45e-01u   0.163
+   6.52e-01u   0.135
+   6.61e-01u   0.107
+   6.68e-01u   0.0816
+   6.75e-01u   0.0628
+   6.82e-01u   0.0408
+   6.91e-01u   0.022
+   6.99e-01u   0.00628


*****************************************
*                                       *
*           IRRADIANCE_ART.CIR          *
*                                       *
*****************************************

*   CALCULATES THE IRRADIANCE OF AN ARTICIAL LIGHT SPECTRUM
*   OF GIVEN ILLUMINACE
*   NODES
*   (90) fluorescent light spectrum
*   (92) irradiance

.include fluorescent_rel.stl
.param gv=1
.param k=0.0292

vfluor 90 0 stimulus vfluorescent_rel

eIRRAD 92 0 value={sdt(v(90)*k*gv*1e6)};irradiance
.tran 0.01u 0.770u 0.38u 0.01u
.probe
.end

*****************************************
*                                       *
*           JSC_ART.LIB                 *
*                                       *
*****************************************


*   IS THE SAME SUBCIRCUIT AS JSC.LIB
*   SUBCIRCUIT CALCULATING THE ANALYTICAL SOLAR CELL MODEL*
    FOR SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY, TOTAL SHORT*
    CIRCUIT CURRENT DENSITY AND
*   QUANTUM EFFICIENCY AND SPECTRAL RESPONSE

*NODES
*(200) REFERENCE
*(201) INPUT,   WAVELENGTH
*(202) INPUT, ABSORPTION COEFFICIENT
```

```
*(203) INPUT, SPECTRAL IRRADIANCE
*(204) INPUT, REFLECTION COEFFICIENT
*(205) OUTPUT, EMITTER SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY
*(206) OUTPUT, BASE SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY
*(207) OUTPUT, TOTAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY
*(208) OUTPUT, TOTAL INTERNAL QUANTUM EFFICIENCY
*(209) OUTPUT, TOTAL INTERNAL SPECTRAL RESPONSE

*DE_NORMALIZATION FACTOR TO ILLUMINANCE=NLUX IS 0.0292*NLUX

******* subcircuit
.param q=1.6e-19
.subckt jsc_art 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209
PARAMS:we=1,lp=1,dp=1,se=1,
+ wb=1, ln=1, dn=1, sb=1

**emitter component

egeom0 230 200 value={1.6e-19*v(202)*v(203)*(0.0292*nlux)*v(201)*(1e16/19.8)*
+ lp*(1-V(204))/(v(202)*lp+1)}

egeom1 231 200 value={cosh(we/lp)+se*(lp/dp)*sinh(we/lp)}
egeom2 232 200 value={se*(lp/dp)*cosh(we/lp)+sinh(we/lp)}
egeom3 233 200 value={(se*(lp/dp)+v(202)*lp-exp(-v(202)*we)*v(232))}


ejsce 205 200 value={v(230)/(v(202)*lp-1)*(-v(202)*lp*
+ exp(-v(202)*we)+v(233)/v(231))};short circuit

eqee 234 200 value={v(205)*19.8/(q*v(203)*(0.0292*nlux)*
+ (1-V(204))*v(201)*1e16)};quantum efficiency

**base component

egeom30 240 200 value={cosh(wb/ln)+sb*ln/dn*sinh(wb/ln)}
egeom31 241 200 value={sb*ln/dn*(cosh(wb/ln)-exp(-v(202)*wb))}
egeom32 242 200 value={sinh(wb/ln)+v(202)*ln*exp(-v(202)*wb)}
egeom33 243 200 value={q*v(202)*v(203)*v(201)*1e16/19.8*0.0292*nlux*
+ (1-v(204))*ln*exp(-we*v(202))/((ln*v(202))^2-1)}
ejscb 206 200 value={v(243)*(v(202)*ln-(v(241)+v(242))/v(240))};short circuit
eqeb 244 200 value={v(206)*19.8/(q*v(203)*(0.0292*nlux)*(1-v
(204))*v(201)*1e16)};quantum efficiency

******* total short circuit current
ejsc 207 200 value={1e6*sdt(v(205)+v(206))}
eqe    208 200 value={(v(234)+v(244))*100}; total quantum efficiency in %
******* quantum efficiency
esr 209 200 value={(v(234)+v(244))*0.808*v(201)}

.ends jsc_art

*******************************************
*                                         *
*            JSC_SILICON_ART.CIR          *
*                                         *
*******************************************

*
*    CALCULATES THE SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY, QUANTUM EFFICIENCY
*    AND SPECTRAL RESPONSE UNDER A FLUORESCENT LIGHT
**    NODES
*    (0) REFERENCE
```

```
*   (21) INPUT,   WAVELENGTH
*   (22) INPUT, ABSORPTION COEFFICIENT
*   (23) INPUT, FLUORESCENT LIGHT SPECTRAL IRRADIANCE
*   (24) INPUT, REFLECTION COEFFICIENT
*   (25) OUTPUT, EMITTER SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT
**  DENSITY
*   (26) OUTPUT, BASE SPECTRAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY
*   (27) OUTPUT, TOTAL SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY
*   (28) OUTPUT, TOTAL INTERNAL QUANTUM EFFICIENCY
*   (29) OUTPUT, TOTAL INTERNAL SPECTRAL RESPONSE


*jsc_silicon_art.cir

.param nlux=257000; illuminance
.include silicon_abs.lib
.include fluorescent_rel.stl
.include wavelength.lib
.include jsc_art.lib

****** circuit

xwavelength 21 0 wavelength
*caux1 21 0 1p
*caux2 25 0 0.1p
xabs 22 0 silicon_abs
vfluor 23 0 stimulus vfluorescent_rel

xjsc_art 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 jsc_art params: we=0.3e-4 lp=0.43e-4 dp=3.4
+se=20000
+ wb=300e-4 ln=162e-4 dn=36.63 sb=1000

vr 24 0 dc 0.1; value of the reflection coefficient

.options itl4=350 reltol=0.01
.tran 0.01u 1.2u 0.3u 0.01u
.option stepgmin
.probe

.end


*******************************************
*                                         *
*     POCKET_CALCULATOR.CIR               *
*                                         *
*******************************************

*   SIMULATES THE CIRCUIT OF A POCKET CALCULATOR
*   UNDER A MIXTURE OF IRRADIANCE AND ILLUMINANCE VALUES

.include module_beh.lib
.param  g=10
.param  gv=500


xmodule 0 92 93 94 95 96 97 98 99 module_beh params: iscmr=8.5e-3 coef_iscm=0 vocmr=2.8
+ coef_vocm=0 pmaxmr=14.2e-3 tr=25 noct=47 ns=4 immr=7.06e-3 vmmr=2.01

virradeff 92 0 pulse (0.1 {g+3.8e-3*gv} 50u 2u 2u 150u 300u); sweep of irradiance
values
vtemp 93 0 dc 25
c1 94 0 1n
```

```
vbat 94 100 dc 1.5
d1 0 100 diode
.model diode d (is=1e-9)
iload 94 0 dc 3.5u
.ic v(94)=1.5
.tran 0u 1000u 0.001u 0.1u
.probe
.end

*******************************************
*                                         *
*    HOUR_RAD_31_BARTOLI.LIB              *
*                                         *
*******************************************


*    NODES
*    (1000) HOUR ANGLE
*     (14)     NUMBER OF DAY
*    (12) RANDOM NUMBER NOT NORMALIZED
*    (11) HORIZONTAL DAILY RADIATION DAY n (Wh/m2_day)
*    (74) HOURLY RADIATION INCLINED SURFACE (Wh/m2_hour)
*    (10) REFERENCE
*    (7)     SUNSET HOUR ANGLE FOR HORIZONTAL SURFACE (RAD)
*    (6)     SUN DECLINATION (RAD)
*    (106) IN-PLANE SUNRISE ANGLE (RAD)
*    (107)   IN-PLANE SUNSET ANGLE (RAD)
*    (50)    EXTRA-ATMOSPHERIC RADIATION HO
*    PARAMETERS N= FIRST DAY OF MONTH CONSIDERED, N=1 JANUARY
*

.subckt hour_rad_31_bartoli 74 10 params: n=1

***** number of day after day n
v_n 14 10 pwl 0u 0, 0.01u {n} ,23.99u {n},24.01u {n+1}, 47.99u {n+1},
+ 48.01u {n+2},71.99u {n+2},72.01u {n+3},95.99u {n+3},96.01u {n+4},
+ 119.99u {n+4},120.01u {n+5},143.99u {n+5},144.01u {n+6},167.99u {n+6},
+ 168.01u {n+7},191.99u {n+7}, 192.01u {n+8},215.99u {n+8},216.01u {n+9},
+ 239.99u {n+9},240.01u {n+10},263.99u {n+10},264.01u {n+11},287.99u {n+11},
+ 288.01u {n+12}, 311.99u {n+12},312.01u {n+13},335.99u {n+13},336.01u {n+14},
+ 359.99u {n+14}, 360.01u {n+15},383.99u {n+15},384.01u {n+16},407.99u {n+16},
+ 408.01u {n+17},431.99u {n+17},432.01u {n+18},455.99u {n+18},456.01u {n+19},
+ 479.99u {n+19},480.01u {n+20},503.99u {n+20},504.01u {n+21},527.99u {n+21},
+ 528.01u {n+22},551.99u {n+22},552.01u {n+23},575.99u {n+23}, 576.01u {n+24},
+ 599.99u {n+24}, 600.01u {n+25}, 623.99u {n+25},624.01u {n+26},647.99u {n+26},
+ 648.01u {n+27},671.99u {n+27},672.01u {n+28},695.99u {n+28},696.01u {n+29},
+ 719.99u {n+29},720.01u {n+30},743.99u {n+30}

***** sinthetic radiation series , average 1734W/m2_day
v_random 12 10 pwl 0u 0,0.1u 917, 23.99u 917, 24.01u 1756,47.99u 1756
+ 48.01u 2213,71.99u 2213,72.01u 1857,95.99u 1857,96.01u 1927,
+ 119.99u 1927,120.01u 2167,143.99u 2167,144.01u 2529,167.99u 2529,
+ 168.01u 1709,191.99u 1709, 192.01u 1974,215.99u 1974,216.01u 2772,
+ 239.99u 2772,240.01u 1401,263.99u 1401,264.01u 1556,287.99u 1556,
+ 288.01u 1875, 311.99u 1875,312.01u 343,335.99u 343,336.01u 1911,
+ 359.99u 1911, 360.01u 402,383.99u 402,384.01u 694,407.99u 694,
+ 408.01u 1368,431.99u 1368,432.01u 2327,455.99u 2327,456.01u 3395,
+ 479.99u 3395,480.01u 2785,503.99u 2785,504.01u 2650,527.99u 2650,
+ 528.01u 1429,551.99u 1429,552.01u 2439,575.99u 2439, 576.01u 1255,
+ 599.99u 1255, 600.01u 953, 623.99u 953,624.01u 888,647.99u 888,
+ 648.01u 1073,671.99u 1073,672.01u 1355,695.99u 1355,696.01u 1468,
+ 719.99u 1468,720.01u 2006,743.99u 2006
```

```
************ average 2000 W/m2day
*v_random 12 10 pwl 0u 0,0.1u 2145, 23.99u 2145, 24.01u 1198,47.99u 1198
*+ 48.01u 2072,71.99u 2072,72.01u 2577,95.99u 2577,96.01u 2158,
*+ 119.99u 2158,120.01u 2237,143.99u 2237,144.01u 2515,167.99u 2515,
*+ 168.01u 2936,191.99u 2936, 192.01u 1984,215.99u 1984,216.01u 2292,
*+ 239.99u 2292,240.01u 3219,263.99u 3219,264.01u 1627,287.99u 1627,
*+ 288.01u 1807, 311.99u 1807,312.01u 2177,335.99u 2177,336.01u 398,
*+ 359.99u 398, 360.01u 2219,383.99u 2219,384.01u 466,407.99u 466,
*+ 408.01u 805,431.99u 805,432.01u 1588,455.99u 1588,456.01u 2702,
*+ 479.99u 2702,480.01u 3942,503.99u 3942,504.01u 3233,527.99u 3233,
*+ 528.01u 3076,551.99u 3076,552.01u 1659,575.99u 1659, 576.01u 2832,
*+ 599.99u 2832, 600.01u 1457, 623.99u 1457,624.01u 1106,647.99u 1106,
*+ 648.01u 1031,671.99u 1031,672.01u 1246,695.99u 1246,696.01u 1573,
*+ 719.99u 1573,720.01u 1704,743.99u 1704

*******dayly horizontal plane radiation and average value
e_hh 11 10 value={v(12)};dayly radiation horizontal plane

*calculation of the irradiance profiles in 31 days

.param pi=3.141592
.param ro=0.5;albedo factor
.func b() {(pi/180)*30};inclination of the collecting surface,(rad)
.func g() {(pi/180)*(0)};azimuth of the collecting surface,g=0 is facing south
.func l() {(pi/180)*41.2};latitude
e_sc 5 10 value={1353*(1+0.0033*cos(pi/180*360/365*v(14)))}

e_a 108 10 value={0.409+0.516*sin(v(7)-1.047)}
e_bb 109 10 value={0.6609-0.467*sin(v(7)-1.047)}
e_d 6 10 value={(pi/180)*23.45*sin((pi/180)*360/365*(v(14)+284))};declination

e_ws 7 10 value={acos(-tan(l)*tan(v(6)))};sunset hour angle at horizontal surface

.func a1() {cos(g)*sin(b)*sin(l)+cos(b)*cos(l)}
.func a2() {sin(b)*sin(g)}
e_a3 8 10 value={-tan(v(6))*(cos(b)*sin(l)-cos(g)*sin(b)*cos(l))}

**** ratio angle of collection over zenith distance
ecoll 20 10 value={(1/(cos(v(1000))-cos(v(7))))*(cos(v(1000))*(cos(g)*sin(b)*
+tan(l)+cos(b))
+ +sin(v(1000))/cos(l)*sin(b)*sin(g)+tan(v(6))*(cos(b)*tan(l)-cos(g)*sin(b)))}

********* in-plane sunset and sunrise angles
e_wps 101 10 value={if(g>0,acos((a1*v(8)-a2*sqrt(a1**2-
+v(8)**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)),
+ acos((a1*v(8)-a2*sqrt(a1**2-v(8)**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)))};in-plane sunset
angle
e_wss 100 10 value={if(g>0,-acos((a1*v(8)+a2*sqrt(a1**2-v(8)**2+a2**2))/
+(a1**2+a2**2)),
+ -acos((a1*v(8)+a2*sqrt(a1**2+v(8)**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)))};in-plane
sunrise angle,takes negative values
*************************************************************************
e_wsss 106 10 value={if (v(100)>-v(7), v(100),-v(7))};real in-plane sunrise angle
e_wpss 107 10 value={if( v(101)>v(7),v(7),v(101))};real in-plane sunset angle

e_ho 50 10
value={24/pi*v(5)*(cos(v(6))*cos(l)*sin(v(7))+v(7)*sin(v(6))*
sin(l))};extraatmospheric radiation Ho

***** correlations

e_rh 51 10 value={pi/24*(v(108)+v(109)*cos(v(1000)))*(cos(v(1000))-
+cos(v(7)))/(sin(v(7))-v(7)*cos(v(7)))}
```

```
e_rd 52 10 value={pi/24*(cos(v(1000))-cos(v(7)))/(sin(v(7))-v(7)*cos(v(7)))}

*********** radiation at the collecting surface

e_hcoll 60 10 value={1e6*sdt(v(74)/31)}; average value in kwh_day

************ radiation components

e_hd 70 10 value={v(11)*(1-1.13/v(50)*v(11))};diffuse radiation horizontal
e_id 71 10 value={v(52)*v(70)}; diffuse
e_ih 72 10 value={v(51)*v(11)}; global horizontal
e_ib 73 10 value={(v(72)-v(71))/(sin(l)*sin(v(6))+cos(l)*cos(v(6))*
+cos(v(1000)))}

********* in-plane radiation

e_icolla 741 10 value={(v(72)-v(71))*v(20)+v(71)/2*(1+cos(b))+v(72)/2*ro*
+(1-cos(b))}
e_icoll 74 10 value={if(v(741)>1 & v(1000)<v(107) & v(1000)>v(106),
+v(741),1)};limit to >10 values

***** time angle in radians, sweeps from -pi to +pi radians in 24 internal units of time

***** time angle

v_w 1000 10 pulse (-3.14 3.14 0 23.99u 0.01u 0.01u 24u);sweeps time angle in radians

.ends hour_rad_31_bartoli




*******************************************
*                                         *
*             FLASH_LIGHT.CIR             *
*                                         *
*******************************************

xirradiance 920 0 hour_rad_31_bartoli params: n=1
.inc hour_rad_31_bartoli.lib


r1 920 92 100
c1 92 0 1000p


xmodule 0 92 93 94 95 96 97 98 99 module_beh params: iscmr=0.126 coef_iscm=20.16e-6
+vocmr=10.4
+ coef_vocm=-0.0368 pmaxmr=0.9828 tr=25 noct=47 ns=16 immr=0.1224 vmmr=8.32
.inc module_beh.lib

vtemp 93 0 dc 5
d1 94 31 diode
.model diode d (is=2e-10)

xbat1 31 0 7 batstdif params: ns=3, SOCm=36, k=.8, D=1e-5, SOC1=0.9
.inc batstdif.cir
if 31 0 dc 17.5e-3
.options abstol =10p reltol=0.01
.tran 1u 744u 0u 0.1u
.probe
.end
```

```
*******************************************
*                                         *
*   STREET_LIGHT_BARTOLI.CIR              *
*                                         *
*******************************************

*    SIMULATES A STREET LIGHT SYSTEM COMPOSED OF BATTERY PV
*     GENERATOR
*    AND A LOAD OF 8 HOURS AT 3.08 AMPS AT 12 VOLTS
*    NODES
*    (1000) HOURLY RADIATION VALUES FOR 31 DAYS OF JANUARY
*    (93) TEMPERATURE PROFILE (°c)
*    (94) OUTPUT, pv GENERATOR OUTPUT NODE
*    (31) BATTERY OUTPUT NODE
*    (7) BATTERY STATE OF CHARGE (SOC)

xirradiance 1000 0 hour_rad_31_bartoli params: n=1
.inc hour_rad_31_bartoli.lib
.inc generator_beh.lib
.include temp_profile.lib
.inc batstdif.cir
r1 1000 92 100
c1 92 0 1000p

xtemp 93 0 temp_profile params:nday=17 tmax=15 tmin=5.5
xgenerator 0 92 93 94 95 96 97 98 09 generator_beh params:
+ iscmr=10.14, coef_iscm=20.6e-6, vocmr=21.6, coef_vocm=-0.0828,pmaxmr=165,
+ noct=47,immr=9.48 , vmmr=17.4, tr=25, ns=36, nsg=1 npg=1

d1 94 31 diode
.model diode d
xbat1 31 0 7 batstdif params: ns=6, SOCm=2400, k=.8, D=1e-5, SOC1=0.3
if 31 0 pulse (0 3.08 20u 0.1u 0.1u 8u 24u)
.options abstol =10p reltol=0.01
.tran 1u 744u 0u 0.1u
.probe
.end

*******************************************
*                                         *
*            TEMP_PROFILE.LIB             *
*                                         *
*******************************************

*    CALCULATES THE AMBIENT TEMPERATURE PROFILE FOR A GIVEN
*     DAY
*    PARAMETERS NDAY=NUMBER OF DAY AFTER 1ST OF JANUARY
*                  TMAX= MAXIMUM TEMPERATURE
*                  TMIN= MINIMUM TEMPERATURE
*       LATITUDE 41.2° NORTH (BARCELONA)

*    NODES
*    (20) OUTPUT, TEMPERATURE (°C )
*    (10)    REFERENCE
.subckt temp_profile 20 10 params: nday=1 tmax=1 tmin=1

.param pi=3.141592


v_w 1000 10 pulse (-3.141592 3.141592 0 24u 0u 0u 24u);time angle in radians


e_temp 20 10 value={if (v(1000)<-v(7), tmax-(tmax-tmin)/2*(1+cos(pi/(pi/6+v(7)-
+2*pi)*
```

```
+ (v(1000)+v(7)))),if( v(1000)<pi/6,
+ tmin+(tmax-tmin)/2*(1+cos(pi/(-v(7)-pi/6)*(v(1000)-pi/6))),
+ tmax-(tmax-tmin)/2*(1+cos(pi/(2*pi-v(7)-pi/6)*v(1000)-
+ (pi+pi*pi/6/(2*pi-v(7)-pi/6))))))}
.func l() {(pi/180)*41.2};latitude

e_d 6 10 value={(pi/180)*23.45*sin((pi/180)*360/365*(nday+284))};declination
e_ws 7 10 value={acos(-tan(l)*tan(v(6)))};sunset hour angle at horizontal surface

.ends temp_profile
```

附录 J　太阳电池基本理论摘要

太阳电池是半导体装置，可以产生光伏效应，将光能转化成电子空穴对，经过移动，被存储在同质结或者异质结的电场中。

支配载流子浓度所需的一组传递方程包含 5 个微分方程，其中两个为少数载流子和多数载流子的电流方程，两个为少数载流子和多数载流子的连续方程，还有一个为泊松方程。这些方程没有解析解，但在一些简单的情况下，特别是满足以下条件：

1）满足稳态状态；

2）结点（空间电荷区）电场不为零；

3）低掺杂度，即少数载流子浓度相对于多数载流子浓度非常小；

4）掺杂浓度是恒定的，即 N_A 为基极受主浓度，N_D 为发射极施主浓度。

则可以写出太阳电池两个不同区域少数载流子的微分方程，也可以通过空间电荷区边界增加的少数载流子电流计算出总电流。

假设一个结构，如图 J-1 所示，可以简写出发射极和基极的方程。

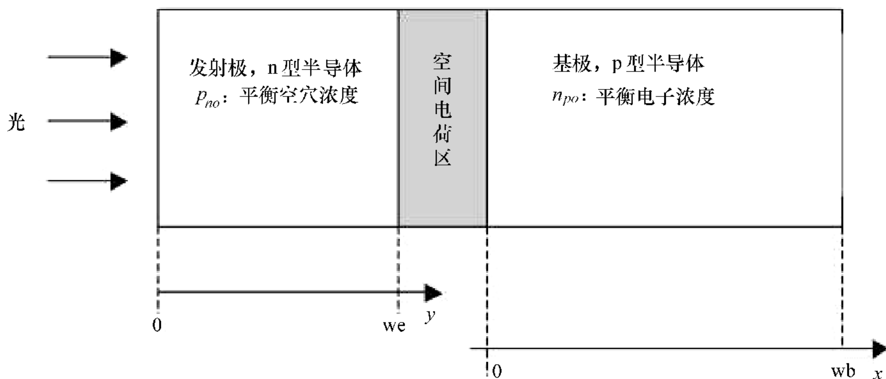


图 J-1　太阳电池横截面示意图

发射极：

$$\frac{1}{q}\frac{\mathrm{d}J_p}{\mathrm{d}y}+\frac{p_n-p_{no}}{\tau_p}-G(y)=0 \tag{J-1}$$

$$J_p=-qD_p\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}y} \tag{J-2}$$

将式（J-1）代入式（J-2），得到：

$$D_p\frac{\mathrm{d}^2p}{\mathrm{d}y^2}-\frac{p_n-p_{no}}{\tau_p}=-\alpha\phi_0\mathrm{e}^{-\alpha y} \tag{J-3}$$

用 $G(y)$ 代替下面的式子：

$$G(y)=\alpha\phi_0\mathrm{e}^{-\alpha y} \tag{J-4}$$

式中，ϕ_0 是半导体表面光照强度，α 是物质的吸收系数，两者的量级都取决于波长。式（J-3）是发射极的少数载流子，即空穴的扩散方程，如果两个边界状态已知，可以解出该方程。我们知道半导体 p－n 结边界条件有如下方程：

$$(p_n - p_{no})_{w_e} = p_{no}(e^{V/V_T} - 1) \tag{J-5}$$

其中，V 是外加电压，假定在结点接触面没有损耗。V_T 是热电位，$V_T = kT/q$，其中 k 为玻尔兹曼常数。

第二个边界状态为半导体表面：

$$J_p(y = 0) = -qS_e(p_n - p_{no}) \tag{J-6}$$

式中，S_e 为发射极表面复合速率，单位为 m/s。为了计算短路电流，边界状态方程式（J-5），我们进一步简化，令 $V=0$，因此 $y = w_e$。

$$P_n - p_{no} = 0 \tag{J-7}$$

式（J-3）有如下分析方法

$$p'_n(y) = p_n - p_{no} = ASh\left(\frac{y}{L_p}\right) + BCh\left(\frac{y}{L_p}\right) + Ce^{-\alpha y} \tag{J-8}$$

其中包括了自然条款和强制性条款。通过两个边界状态，并将强制响应代入微分方程，可以得到这三个常数，有如下表达式：

$$A = BS_e\frac{L_p}{D_p} - \frac{\alpha\phi\tau_p\frac{L_p}{D_p}(S_e + \alpha D_p)}{L_p^2\alpha^2 - 1} \tag{J-9}$$

$$B = \frac{\alpha\phi\tau_p}{L_p^2\alpha^2 - 1}\frac{e^{-\alpha w_e} + \frac{L_p}{D_p}Sh\left(\frac{w_e}{L_p}\right)(S_e + \alpha D_p)}{S_e\frac{L_p}{D_p}Sh\left(\frac{w_e}{L_p}\right) + Ch\left(\frac{w_e}{L_p}\right)} \tag{J-10}$$

$$C = -\frac{\alpha\phi\tau_p}{L_p^2\alpha^2 - 1} \tag{J-11}$$

通过这三个常数值，我们可以清楚地知道空穴浓度。我们还需要知道在 $y = w_e$ 这点的空穴浓度值，将式（J-8）代入第 2 章中的式（2.2），可以由下面的式子计算：

$$J_p(y = w_e) = -qD_p\left(\frac{dp}{dy}\right)_{y = w_e} \tag{J-12}$$

基极

在基极，电子是少数载流子，参考表 J-1 的数据，我们可以得到如下半导体方程：

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dy} + \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - G(y) = 0 \tag{J-13}$$

$$J_p = -qD_p\frac{dp}{dy} \tag{J-14}$$

将式（J-14）代入到式（J-13），得到

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} = -\alpha_0 \phi'_0 e^{-\alpha x} \tag{J-15}$$

式中，ϕ'_0是基极光照强度，式（J-15）是电子的扩散方程，如果边界的状态可知，我们可以解出这个方程。基极边界的 p－n 结方程为：

$$(n_p - n_{po})_0 = n_{po}(e^{V/V_T} - 1) \tag{J-16}$$

第二个边界状态被应用于另一个基极，如下：

$$J_n(x = w_b) = -qS_b(n_p - n_{po}) \tag{J-17}$$

式中，S_b 是基极表面复合速率，单位为 m/s。为了计算边界的短路电流，即式（J-16），进一步简化的设定 $V=0$，因此 $x=0$。

$$n_p - n_{po} = 0 \tag{J-18}$$

式（J-15）有如下分析方法：

$$n'_p(x) = n_p - n_{po} = A'Sh\left(\frac{x}{L_n}\right) + B'Ch\left(\frac{x}{L_n}\right) + C'e^{-\alpha x} \tag{J-19}$$

其中的常数，由边界状态得到：

$$A' = \frac{\alpha\phi'_0\tau_n}{L_n^2\alpha^2 - 1} \frac{e^{-\alpha w_b}(\alpha D_n - S_b) + \frac{D_n}{L_n}Sh\left(\frac{w_b}{L_n}\right) + S_b Ch\left(\frac{w_b}{L_n}\right)}{S_b Sh\left(\frac{w_b}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n}Ch\left(\frac{w_b}{L_n}\right)} \tag{J-20}$$

$$B' = \frac{\alpha\phi'_0\tau_n}{L_n^2\alpha^2 - 1} \tag{J-21}$$

$$C' = -B' \tag{J-22}$$

从这些常数值，我们可以推导出第 2 章式（2-3）。

黑暗特性

太阳电池的黑暗特性，可以从式（J-3）和式（J-15）推导得出。使得，$\phi_0 = 0$，$\phi'_0 = 0$，$V \neq 0$。

此时，可以解出第 2 章中关于基极和发射极的式（2-13）和式（2-14）。

参数值

太阳电池黑暗和光照等式需要的一些半导体常数值如下：

（1）发射极

1）空穴迁移率 μ_p；

2）空穴寿命 τ_p；

3）均衡空穴浓度 n_p。

（2）基极

1）电子迁移率 μ_n；

2）电子寿命 τ_n；

3）均衡电子浓度 n_p。

少数载流子的迁移率和寿命取决于掺杂浓度和上文所建立的几个模型。这些总结于表 J-1 中，被广泛使用（N 为掺杂浓度）。

最后给出平衡载流子浓度（对于一个 n 型半导体）：

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_{Deff}}$$

表 J-1　参数模型

	p 型	n 型
迁移率（$cm^2/v.s$）	$\mu_n = 232 + \dfrac{1180}{\left(1+\dfrac{N}{810^{18}}\right)^{0.9}}$	$\mu_p = 130 + \dfrac{370}{\left(1+\dfrac{N}{810^{17}}\right)^{1.25}}$
	参考文献［J. 1］	参考文献［J. 3］
带隙变窄（eV）	$\Delta Eg = 910^{-3}\ (F + \sqrt{0.5 + F^2})$	$\Delta Eg = 18.710^{-3}\ln\left(\dfrac{N}{710^{17}}\right)$
	$F = \ln\left(\dfrac{N}{110^{17}}\right)_{N>11017}$	$N > 710^{17}$
	参考文献［J. 2］	参考文献［J. 3］
寿命（s）	$\dfrac{1}{\tau} = 3.4510^{-12}N + 0.9510^{-31}N^2$	$\dfrac{1}{\tau} = 7\times10^{-13}N + 1.810^{-31}N^2$
	参考文献［J. 1］	参考文献［J. 3］

其中

$$N_{Deff} = N_D e^{-\frac{\Delta Eg}{kT}}$$

对于 p 型

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{N_{Aeff}}$$

其中

$$N_{Aeff} = N_A e^{-\frac{\Delta Eg}{kT}}$$

式中，n_i 是本征载流子浓度，N_A 是受主浓度，N_D 是施主浓度。

参 考 文 献

[J.1] Swirhun, S.E., Kwark, Y.H., Swanson R.M., ‘Measurement of elecron mobility and bandgap narrowing in heavily doped p-type silicon’, *IEDM Technical Digest*, p. 24, 1986.

[J.2] Slotboom, J.W., de Graaf H.C., ‘Measurement of bandgap narrowing in silicon bipolar transistors’, *Solid State Electronics*, **19**, p. 857, 1976.

[J.3] del Alamo, J., Swirhun, S.E., Swanson, R. M., ‘Simultaneous measurement of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon’, *IEDM Technical Digest*, p. 24, 1986.

附录 K　任意取向表面辐射的估计

在绝大多数 PV 系统设计中，需要计算任意取向表面的光照和辐射的原因有两点：①众所周知，水平地表接收所有太阳光的辐射；②很少有设备需要一个水平收集表面。

估计一些特定表面的太阳光辐射是一件很复杂的事情，它包含许多参数和计算程序，还有大量的对该地区的测量和观察数据。国际机构推动了这方面的研究，一些专家报道程序和结果见参考文献［K. 1］，还有［K. 2］，［K. 3］。

这本书的目的局限于对 PV 系统的基础建模，对太阳光辐射的详细叙述和对特定表面的计算不在本书的讨论范围内。但是，这里给出了一些概念的简要总结，以提供 PSpice 代码实现简化的程序算法。

太阳坐标

观测太阳的位置有两套天体坐标系，一种是通过水平球面坐标的方位角（a），海拔高度（h）测定，一种是通过赤道球面坐标的赤道纬度角（δ）和的时角（ω）测定。

太阳偏角每天都是不同的，一般在 $-23.45°$（冬至）~ $+23.45°$（夏至）。偏角在春分和秋分是零（春天和秋天）。测定某一天的太阳偏角，近似算法如下：

$$\delta = 23.45\sin\left[\frac{360}{365(N+284)}\right] \tag{K-1}$$

单位是°。N 是从每年 1 月 1 号算起的天数[K. 4]。

时角的起点被认为是在北半球以南方向，在南半球以北方向。时角和在我们手表上的官方时间之差取决于到零时区起点的距离。此外，一些国家还采用引入额外时移的惯例，每年钟表会被提前或者调后两次。

一些对时间公式的近似分析，被称为 Analem A11。其中一个如[K. 4]：

$$ET = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{K-2}$$

ET 精确到分，而且

$$B = \frac{360}{364}(N-81) \tag{K-3}$$

时角和我们手表上的官方时间的关系是：

$$OT = 12 + TA + \frac{180}{\pi}\frac{\omega}{15} - \frac{ET}{60} + \frac{LL-LH}{15} \tag{K-4}$$

式中，OT 是以小时为单位的官方时间，TA 是以小时为单位的周期性提前时间，ET 等于时间的分，LL 是该地区的经度，LH 是该时区的起始经度。

太阳的水平坐标为：

$$\sin h = \sin\lambda\sin\delta + \cos\lambda\cos\delta\cos\omega \tag{K-5}$$

$$\sin\alpha = \frac{\cos\lambda\cos\omega}{\cosh} \tag{K-6}$$

式中，λ 为该地区的纬度。天顶角距是与太阳高度角互补的：

$$\cos\vartheta_z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - h\right) = \sin h \tag{K-7}$$

日落角

日落角是通过令式（K-5）中 $h=0$ 得到的：

$$\cos\omega_s = -\tan\lambda\tan\delta \tag{K-8}$$

光照构成

全光照在收集表面的值 I_{coll} 由三部分构成：①直接光照，代表来自太阳这一点光源的光照；②漫射，代表天空这一分散辐射源的光照；③反射光照，代表从附近表面反射的辐射。

这三个量可以从三个原始量中计算出来：

I_b 太阳光直射的光照。

I_h 水平面的所有光照。

I_d 水平面的漫射光照。

由于这些数据的有效性，使得计算更加简单。

全球在任意方向表面的总光照为[K.5]：

$$I_{coll} = I_b\cos\vartheta_{coll} + \frac{I_d}{2}(1+\cos\beta) + \frac{I_h}{2}\rho(1-\cos\beta) \tag{K-9}$$

式中，ϑ_{coll} 代表在垂直于收集表面和太阳在这一刻方向之间的角度。ρ 是反射系数。令式（K-9）中 $\beta=0$，得到这三个初始量进一步的关系：

$$I_h = I_b\cos\vartheta_z + I_d \tag{K-10}$$

光照分量的瞬时值通常是未知的，除非详细监控设备已经到位。为了估算辐射的有效性或为给定的光伏阵列选择方位角和倾斜角，需要用到更多的专门数据，一般为辐射值，即时间对若干年光照平均值的积分。因此，手册或表格通常提供一年中每个月平均每天收到的辐射值。使用这些值可以估计辐射值和辐射的构成，如同下面章节所描述的。

大气层外辐射

一个对辐射计算非常有用的量就是大气层外辐射 H_o，它是在一天中大气层外的水平表面接收到的辐射值。经过综合所有角度（从 $-\omega_s \sim +\omega_s$），有：

$$H_o = \frac{24}{\pi}SC(\omega_s\sin\lambda\sin\delta + \cos\lambda\cos\delta\omega_s) \tag{K-11}$$

式中，SC 是太阳常数。H_o 的值一般取超过一个月的 H_o 平均值。

辐射相关量

表述辐射组成的通常办法是使用辐射组成的值，即在一个水平面上每日总辐射的月平均值 H_h 和从式（K-11）中计算出的大气层外照射值 H_o。书中还提及了一些相关量，分别被定义为：

I_h（kWh/m^2_小时）水平表面每小时全辐射的月度平均值。这个值在时间间隔的中段更接近全水平辐射值。

H_h（kWh/m^2_天）水平表面每天全辐射的月度平均值。

这两个量的关系与时角和位于当年的天数相关，关系如下：

$$\frac{\bar{I}_h}{\bar{\bar{H}}_h} = r_h = \frac{\pi}{24}(a + b\cos\omega)\frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s\cos\omega_s} \qquad (K\text{-}12)$$

其中：

$$a = 0.409 + 0.516\sin(\omega_s - 1.047) \qquad (K\text{-}13)$$

$$b = 0.6609 - 0.467\sin(\omega_s - 1.047) \qquad (K\text{-}14)$$

此外，漫射量的每小时和每天平均辐射值的定义为：

I_d（kWh/m^2_小时）水平表面每小时漫射的月度平均值。这个数值在时间间隔的中间段更接近水平漫射辐射。

H_d（kWh/m^2_天）水平表面每天漫射的月度平均值。

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{\bar{H}}_d} = r_d = \frac{\pi}{24}\,\frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s\cos\omega_s} \qquad (K\text{-}15)$$

最后每天的漫射和总辐射的月平均值的关系，包括在参考文献（K.6）的模型中：

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{\bar{H}}_h} = 1 - 1.13\bar{k}_h \qquad (K\text{-}16)$$

其中

$$\bar{k}_h = \frac{\bar{H}_h}{\bar{\bar{H}}_o}$$

是大气的透明指数。

收集表面光照（l_{coll}）

根据式（K-1）~式（K-16），在任意取向斜面的光照，可以根据以上定义的量和角 ϑ_{coll}、ϑ_z 的余弦来计算：

$$\frac{\cos\vartheta_{coll}}{\cos\vartheta_z} = \frac{1_s}{\cos\omega - \cos\omega_s}\Big[\cos\omega(\cos g\ \sin\beta \cdot \tan\lambda + \cos\beta) + \frac{\sin\omega}{\cos\lambda}\sin\beta\ \sin g + \tan\delta(\cos\beta \cdot \tan\lambda - \cos g\ \sin\beta)\Big] \qquad (K\text{-}17)$$

式中，g 是收集表面的方位角，它的初始值为朝南和向西。

在收集表面的光照为：

$$I_{coll}=I_b\cos\vartheta_{coll}+\frac{I_d}{2}(1+\cos\beta)+\frac{I_h}{2}\rho(1-\cos\beta)$$

（K-18）

式中，ρ 是反射系数（在该地点测量）。地面上常规值范围是0.15 ~0.22。

由于式（K-10）：

$$I_b=\frac{I_h-I_d}{\cos\vartheta_z} \tag{K-19}$$

因此

$$I_{coll}=(I_h-I_d)\frac{\cos\vartheta_{coll}}{\cos\vartheta_z}+\frac{I_d}{2}(1+\cos\beta)\frac{I_h}{2}\rho(1-\cos\beta) \tag{K-20}$$

最终得到给定时角、天数、纬度和任意取向平面的辐射值。

平面日落和日出角

式（K-20）的结果在特定的日照长度条件是有效的。更为精确的使用收集表面的所谓的“表现”天长。这个表现长度被定义为表现日出和表现平面日落之间的角度，当此角度 $\vartheta_{coll}=90°$时。如果将此条件代入到式(K-17)中。

$$0=[\cos\omega(\cos g\sin\beta\cdot\tan\lambda+\cos\beta)+\frac{\sin\omega}{\cos\lambda}\sin\beta\sin g+\tan\delta(\cos\beta\cdot\tan\lambda-\cos g\sin\beta)]$$

（K-21）

令

$$A=\cos\omega \tag{K-22}$$

$$a_1=\cos g\sin\beta\sin\lambda+\cos\beta\cos\lambda \tag{K-23}$$

$$a_2=\sin\beta\sin g \tag{K-24}$$

$$a_3=-\tan\delta(\cos\beta\sin\lambda+\cos g\sin\beta\cos\lambda) \tag{K-25}$$

然后得到 A

$$A=\frac{a_1a_3\pm a_2\sqrt{a_1^2-a_3^2+a_2^2}}{a_1^2+a_2^2} \tag{K-26}$$

最后

$$\omega_{ps}=\cos^{-1}\frac{a_1a_3-a_2\sqrt{a_1^2-a_3^2+a_2^2}}{a_1^2+a_2^2} \tag{K-27}$$

和

$$\omega_{ss}=-\cos^{-1}\frac{a_1a_3+a_2\sqrt{a_1^2-a_3^2+a_2^2}}{a_1^2+a_2^2} \tag{K-28}$$

式中，ω_{ps}是日出表现角，ω_{ss}是日落表现角。

任意方向表面的总辐射

辐射是时间对光照的积分，通常为一天的时间。为了计算这个值，在（K-20）中的辐射值 I_{collI}需要积分。积分边界会使日出和日落角变小，无论是收集表面表现的 ω_{ps} 和 ω_{ss}，还是水平表面的 $\pm\omega_s$。于是得到了两个新的日落和日出角值：

$$\omega_{sss} = \min（\omega_{ss}, -\omega_s） \quad （K-29）$$

$$\omega_{pss} = \min（\omega_{ps}, \omega_s） \quad （K-30）$$

积分公式（K-20）：

$$\overline{H}_{coll} = \overline{H}_h \int_{\omega_{sss}}^{\omega_{pss}} r_h \frac{\cos\vartheta_{coll}}{\cos\vartheta_z} d\omega - \overline{H}_d \int_{\omega_{sss}}^{\omega_{pss}} r_d \frac{\cos\vartheta_{coll}}{\cos\vartheta_z} d\omega + \overline{H}_d \int_{\omega_{sss}}^{\omega_{pss}} \frac{r_d}{2}(1+\cos\beta) d\omega + \overline{H}_h \int_{\omega_{sss}}^{\omega_{pss}} \frac{r_h}{2}\rho(1-\cos\beta) d\omega$$

如果取每月日落和日出的平均值，则可以得到每天的平均值。每天和每小时的辐射量关系已经应用。PSpice 网络表文件中定义这几个积分分别为 f1，f2，f3 和 f4。

一月中每天平均辐射图

一般情况下，要计算 12 个平均天，每个月一天。通常也会确定每个月份的特定一天作为最接近的平均天。这些是 6 月 10 日、12 月 11 日，2 月、4 月、5 月和 11 月 15 日，3 月、8 月、9 月、10 月 16 日和 1 月、7 月 17 日。

为了估计在某一特定时间的全光照值，已知小时与天的关系：

$$\overline{I}_h = r_h \overline{H}_h$$

可以得到 $\overline{I}_h$

$$\overline{I}_h = \frac{1}{T}\int_0^T I_h(t)\,dt$$

$T=1$ 小时，$I_h(T/2)$ 的值是在时段中间，如果一小时内的光照瞬时值与小时角呈线性关系，可近似得到：

$$\overline{I}_h = \frac{1}{T}\int_0^T I_h(t)\,dt \approx \frac{1}{T} T I_h(T/2) = I_h(T/2)$$

表明每小时辐射值（Wh/m^2_小时）等于在时段中间的光照值（W/m^2）：

$$I_h\left(\frac{T}{2}\right) \approx \overline{I_h} = r_h \overline{H}_h$$

相同的方法用于散射成分可得到：

$$I_d\left(\frac{T}{2}\right) \approx \overline{I_d} = r_d \overline{H}_d$$

这些值应用在式（K-20）中来计算在收集平面的光照强度，并且该程序适用于任何时间段。

图 K-1 和 K-2 显示了两个计算范例，使用了同一天，同一地点，但收集平面方向不同的数据。可以发现，朝南面的平面有一个对称的光照曲线，而平面朝向与南面有一个给定角度的平面有一个非对称的光照曲线。当然积分数值，即辐射量也是不一样的，在相同的角度上，朝南的平面收集更多的辐射。

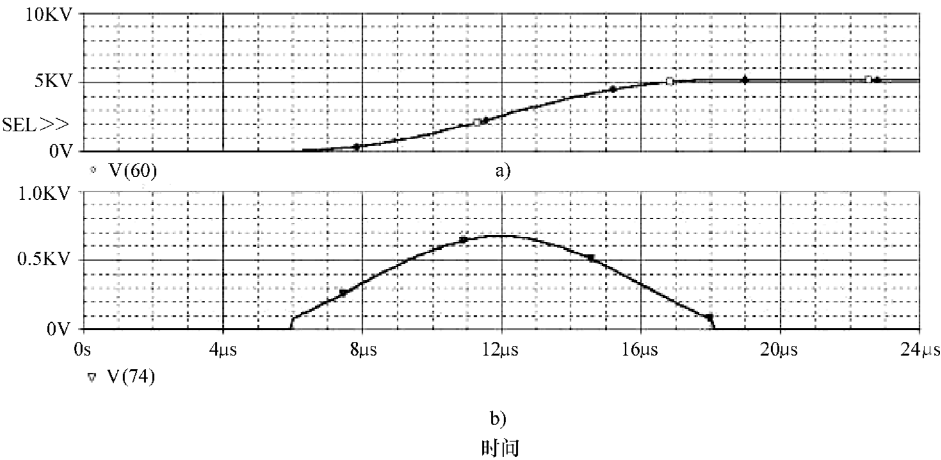


图 K-1　a）辐射量，单位为 Wh；b）辐射度，单位为 W/m^2

注：6 月 21 日，纬度是 41.2°。收集平面与地面水平时 6 月份辐射量的平均值（5638Wh/天）。

x 轴为内部时间（时间单位是 μs），对应于小时，覆盖了一天 24h 的时间。

PSpice 性能分析

PSpice 软件能够完成所谓的性能分析，这是建立在参量分析和对目标函数的评价上的。

参量分析方法是分析直流或者瞬态现象，在给定的参量中选取一组有价值的数据。在这种分析中，PSpice 允许使用者评估从内置函数中定义或选择出的目标函数。

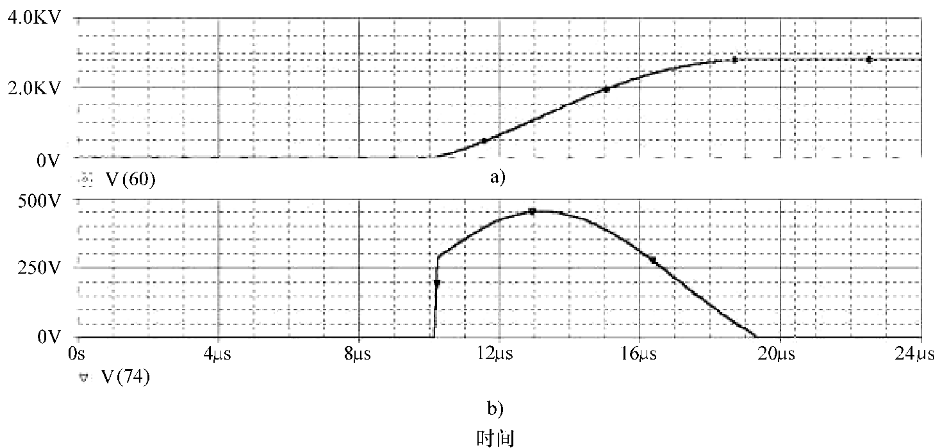


图 K-2　a）辐射量，单位为 Wh；b）辐射度，单位为 W/m^2

注：坐标为北纬 41.2°，西经 30°时于 6 月 21 日收集平面与垂直面成 30°角。

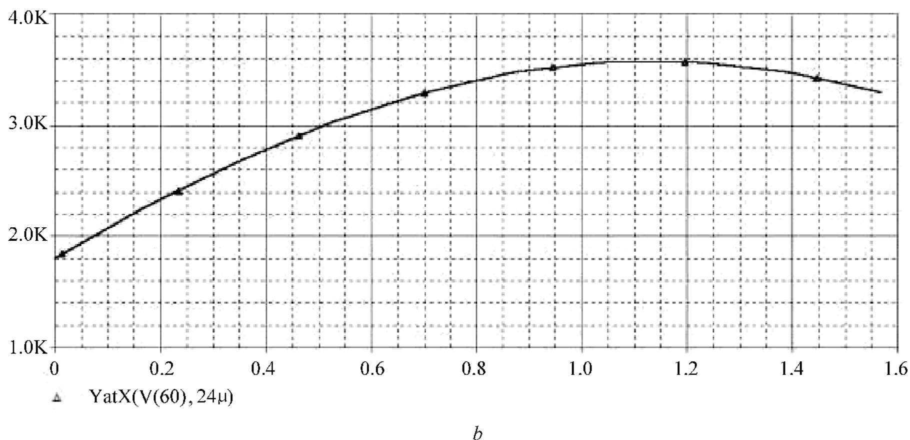


图 K-3　y 轴为一天单位面积的辐射量（kWh/m^2_ 天），

x 轴为倾斜角度 b（弧度）。

注：图中给出了不同的倾斜角时，位于北纬 41.2°1 月份时收集面朝南时的全部的辐射量，

当倾角为 0°时一天单位面积的辐射量为 1800Wh/m^2_ 天。

使用这种功能分析在固定的角度和不同的倾斜角时，收集到的辐射量的大小。通过这种方法，PSpice 将显示角度对辐射量的影响。

首先使用参量分析，建立从 0°～90°对角度 β 扫描。添加一行 PSpice 代码在 irradiation_1day.cir 中。如下：

```
.step param b list 0, 0.1744, 0.3488, 0.5232, 0.6976, 0.872, 1.046, 1.2208,
1.3952, 1.569
```

b 的值用弧度表示。结果命名为 irradiation_abacus.cir。

一旦对所有角度β的扫描完成，则设置x轴为“性能分析”，在一天结束的时候，由于我们对收集到的辐射量大小感兴趣，从 trace 菜单中选择其作为“评估目标函数”，我们选择：

YatX(v(60),24u)

这个函数将以将β角自变量作为横轴，以全天的 v(60)的数值作为纵轴的曲线描述出来。与图 K-3 中列出的值相比，这个结果与在第 1 章中可用的太阳辐射量的结果是相吻合的。

参 考 文 献

[K.1] Commission of the European Communities ‘Prediction of solar radiation on inclined surfaces’, *Solar Energy R&D in the European Community*, Series F, volume 3, D. Riedel, 1986.

[K.2] Klein, S., ‘Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces’ *Solar Energy*, **19**, 325–9, 1977.

[K.3] Meinel, B. and Meinel, M.P., *Applied Solar Energy*, Addison Wesley, 1977.

[K.4] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York, 1991.

[K.5] Hernandez, F., Ramos, F., Tinaut, D., Rodríguez, M., Diaz-Salgado, C., Macías, M. Blanco, M.E., *Metodología y cálculo de radiación para colectores concentradores’ CSIC, Madrid, Spain 1987.*

[K.6] Page, J.K., *Proceedings of the UN Conference on New Energy Sources*, **4**, 378, 1964.


```
***********************************
*                                 *
*         RADIATION_1DAY.CIR      *
*                                 *
***********************************

*    CALCULATES THE RADIATION COMPONENTS AT AN ARBITRARILY ORIENTED
*    SURFACE ALONG ONE DAY

*    NODES
*    (10) HOUR ANGLE, RADIANS
*    (20) ANGLE RATIO IN EQUATION A11.17
*    (50) EXTRAATMOSPHERIC RADIATION
*    (51) CORRELATION RATIO RH
*    (52) CORRELATION RATIO RD
*    (60) GLOBAL RADIATION AT INCLINED SURFACE (WH/M2_DAY)
*    (70) DIFFUSE RADIATION AT INCLINED SURFACE (WH/M2_DAY)
*    (71) DIFFUSE COMPONENT OF IRRADIANCE AT INCLINED SURFACE, ID (W/M2)
*    (72) GLOBAL IRRADIANCE AT HORIZONTAL SURFACE, IH (W/M2)
*    (74) GLOBAL IRRADIANCE INCLINED SURFACE, ICOLL (W/M2)
*     (106) SUNSET ANGLE, INCLINED SURFACE, RADIANS
*    (107) SUNRISE ANGLE AT INCLINED SURFACE, RADIANS
*    (108)    DECLINATION, RADIANS

**** parameter values and data
.param pi=3.14159265
.param hh=5638;global radiation in horizontal surface
.param n-172;day of the year starting january first
```

```
.param ro=0.5;albedo factor
.func b() {(pi/180)*90};inclination of the collecting surface,(rad)
.func g() {(pi/180)*(30)};azimuth of the collecting surface,g=0 is facing south
.func l() {(pi/180)*41.2};latitude
.func sc() {1353*(1+0.0033*cos(pi/180*360/365*n))}
.func a() {0.409+0.516*sin(ws-1.047)}
.func bb() {0.6609-0.467*sin(ws-1.047)}
.func d() {(pi/180)*23.45*sin((pi/180)*360/365*(n+284))};declination
.func ws() {acos(-tan(l)*tan(d))};sunset hour angle at horizontal surface
.func a1() {cos(g)*sin(b)*sin(l)+cos(b)*cos(l)}
.func a2() {sin(b)*sin(g)}
.func a3() {-tan(d)*(cos(b)*sin(l)-cos(g)*sin(b)*cos(l))}

**** ratio angle of collection over zenith distance
ecoll 20 0 value={(1/(cos(v(10))-cos(ws)))*(cos(v(10))*(cos(g)*sin(b)*tan(l)
+cos(b))
+ +sin(v(10))/cos(l)*sin(b)*sin(g)+tan(d)*(cos(b)*tan(l)-cos(g)*sin(b)))}

********* in-plane sunset and sunrise angles
.func wps() {if(g>0,acos((a1*a3-a2*sqrt(a1**2-a3**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)),
+ acos((a1*a3-a2*sqrt(a1**2-a3**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)))};in-plane sunset
*angle
.func wss() {if(g>0,-acos((a1*a3+a2*sqrt(a1**2-a3**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)),
+ -acos((a1*a3+a2*sqrt(a1**2+a3**2+a2**2))/(a1**2+a2**2)))};in-plane sunrise
*angle,takes negative values
***********************************************************************
.func wsss() {if (wss>-ws, wss,-ws)};real in-plane sunrise angle
.func wpss() {if( wps>ws,ws,wps)};real in-plane sunset angle

e_ho 50 0 value={24/pi*sc*(cos(d)*cos(l)*sin(ws)+ws*sin(d)*sin(l))};
*extraatmospheric radiation Ho

***** Irradiance -irradiation correlations

e_rh 51 0 value={pi/24*(a+bb*cos(v(10)))*(cos(v(10))-cos(ws))/(sin(ws)-
+ws*cos(ws))}
e_rd 52 0 value={pi/24*(cos(v(10))-cos(ws))/(sin(ws)-ws*cos(ws))}

****** Irradiation integrals F1, F2, F3 and F4

e_f11 531 0 value={if( v(10)>wsss & v(10)<wpss, v(51)*v(20), 0)};integrand F1
e_f1 53 0 value={sdt(v(531))}; integral F1

e_f21 541 0 value={if(v(10)>wsss & v(10)<wpss, v(52)*v(20), 0)};integrand F2
e_f2 54 0 value={sdt(v(541))};integral F2

e_f31 551 0 value={if(v(10)>wsss & v(10)<wpss, v(52)*(1+cos(b))/2, 0)};integranf F3
e_f3 55 0 value={sdt(v(551))};integral F3

e_f41 561 0 value={if(v(10)>wsss & v(10)<wpss, v(51)*ro/2*(1-cos(b)), 0)};inte-
+grand F4
e_f4 56 0 value={sdt(v(561))};integralF4


*********** Irradiation at the collecting surface

e_hcoll 60 0 value={1e6*hh*((v(53)+v(56))-(v(54)-v(55))*(1-1.13 *
+(hh/v(50))))};global radiation



************ irradiance components
```

```
e_hd 70 0 value={hh*(1-1.13/v(50)*hh)};diffuse radiation
e_id 71 0 value={v(52)*v(70)}; irradiance diffuse
e_ih 72 0 value={v(51)*hh};irradiance global horizontal
e_ib 73 0 value={(v(72)-v(71))/(sin(l)*sin(d)+cos(l)*cos(d)*cos(v(10)))}

********* in-plane irradiance

e_icolla 741 0 value={(v(72)-v(71))*v(20)+v(71)/2*(1+cos(b))+v(72)/2*ro*
+(1-cos(b))}
e_icoll 74 0 value={if(v(741)>0 &v(10)<wpss & v(10)>wsss, v(741),0)};limit to posi-
*tive values

***** time angle in radians, sweeps from -pi to +pi radians in 24 internal units of time

v_w 10 0 pulse (-3.14 3.14 0 23.99u 0.01u 0.01u 24u);time angle in radians

.probe
.tran 0u 24u 0u 0.1u

***** check and print magnitudes

e_wss 100 0 value={wss}
e_wps 101 0 value={wps}
e_ws 102 0 value={ws}
e_a1 103 0 value={a1}
e_a2 104 0 value={a2}
e_a3 105 0 value={a3}
e_wsss 106 0 value={wsss}
e_wpss 107 0 value={wpss}
e_d 108 0 value={d}
. print tran v(100) v(101)v(102)v(103) v(104) v(105) v(106) v(107) v(741)
+v(74) v(108)
.end

***********************************
*                                 *
*      RADIATION_ABACUS.CIR       *
*                                 *
***********************************

**** CALCULATION OF THE VALUES OF HCOLL AS A FUNCTION OF THE TILT ANGLE b FOR A
*** CONSTANT AZIMUTH AND A GIVEN DAY
*    AFTER RUNNING THE SIMULATION, SELECT IN THE AXIS SETTINGS MENU
*    IN X-AXIS, PERFORMANCE ANALYSIS, AND THEN
*    FROM TRACE MANU, SELECT EVALUATION OF GOAL FUNCTION
*    CHOOSE YatX(v(60),24u)
*** parameter values and data
.param pi=3.14159265
.param hh=1800;global radiation in horizontal surface
.param n=355;day of the year starting january first
.param ro=0.5;albedo factor
.param b=0
.func g() {(pi/180)*(0)};azimuth of the collecting surface,g=0 is facing south
.func l() {(pi/180)*41.2};latitude
.func sc() {1353*(1+0.0033*cos(pi/180*360/365*n))}
.func a() {0.409+0.516*sin(ws-1.047)}
.func bb() {0.6609-0.467*sin(ws-1.047)}
.func d() {(pi/180)*23.45*sin((pi/180)*360/365*(n+284))};declination
.func ws() {acos(-tan(l)*tan(d))};sunset hour angle at horizontal surface
e_a1 103 0 value={cos(g)*sin(b)*sin(l)+cos(b)*cos(l)}
e_a2 104 0 value={sin(b)*sin(g)}
```

```
e_a3 105 0 value={-tan(d)*(cos(b)*sin(l)-cos(g)*sin(b)*cos(l))}

**** ratio angle of collection over zenith distance
ecoll 20 0 value={(1/(cos(v(10))-cos(ws)))*(cos(v(10))*(cos(g)*sin(b)*tan(l)+-
+cos(b))
+ +sin(v(10))/cos(l)*sin(b)*sin(g)+tan(d)*(cos(b)*tan(l)-cos(g)*sin(b)))}

********* in-plane sunset and sunrise angles
e_wps 101 0 value={acos((v(103)*v(105)-v(104)*sqrt(v(103)**2-v(105)**2
+v(104)**2))/(v(103)**2+v(104)**2))};in-plane sunset angle
e_wss 100 0 value={-acos((v(103)*v(105)+v(104)*sqrt(v(103)**2-v(105)**2
+v(104)**2))/(v(103)**2+v(104)**2))};in-plane sunrise angle,takes negative
*values
**********************************************************************
e_wsss 106 0 value={if (v(100)>-ws, v(100),-ws)};real in-plane sunrise angle
e_wpss 107 0 value={if( v(101)>ws,ws,v(101))};real in-plane sunset angle

e_ho 50 0 value={24/pi*sc*(cos(d)*cos(l)*sin(ws)+ws*sin(d)*sin(l))};extraatmo-
*spheric radiation Ho

***** Irradiance -irradiation correlations

e_rh 51 0 value={pi/24*(a+bb*cos(v(10)))*(cos(v(10))-cos(ws))/(sin(ws)-
+ws*cos(ws))}
e_rd 52 0 value={pi/24*(cos(v(10))-cos(ws))/(sin(ws)-ws*cos(ws))}

****** Irradiation integrals F1, F2, F3 and F4

e_f11 531 0 value={if( v(10)>v(106) & v(10)<v(107), v(51)*v(20), 0)};integrand F1
e_f1 53 0 value={sdt(v(531))}; integral F1

e_f21 541 0 value={if(v(10)>v(106) & v(10)<v(107), v(52)*v(20), 0)};integrand F2
e_f2 54 0 value={sdt(v(541))};integral F2

e_f31 551 0 value={if(v(10)>v(106) & v(10)<v(107), v(52)*(1+cos(b))/2, 0)};
*integranf F3
e_f3 55 0 value={sdt(v(551))};integral F3

e_f41 561 0 value={if(v(10)>v(106) & v(10)<v(107), v(51)*ro/2*(1-cos(b)), 0)};
*integrand F4
e_f4 56 0 value={sdt(v(561))};integralF4


*********** Irradiation at the collecting surface

e_hcoll 60 0 value={1e6*hh*((v(53)+v(56))-(v(54)-v(55))*(1-1.13 *(hh/
+v(50))))};global radiation


************ irradiance components

e_hd 70 0 value={hh*(1-1.13/v(50)*hh)};diffuse radiation
e_id 71 0 value={v(52)*v(70)}; irradiance diffuse
e_ih 72 0 value={v(51)*hh};irradiance global horizontal
e_ib 73 0 value={(v(72)-v(71))/(sin(l)*sin(d)+cos(l)*cos(d)*cos(v(10)))}

********* in-plane irradiance

e_icolla 741 0 value={(v(72)-v(71))*v(20)+v(71)/2*(1+cos(b))+v(72)/2*ro*
+(1-cos(b))}
e_icoll 74 0 value={if(v(741)>0 & v(10)<v(107) & v(10)>v(106), v(741),0)};limit to
*positive values
```

```
***** time angle in radians, sweeps from -pi to +pi radians in 24 internal units of time

v_w 10 0 pulse (-3.14 3.14 0 23.99u 0.01u 0.01u 24u);time angle in radians

.probe
.tran 0u 24u 0u 0.1u
.step param b list 0, 0.1744, 0.3488, 0.5232,0.6976, 0.872, 1.046, 1.2208,
+1.3952,1.569


.end
```

Copyright © 2011 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice >, ISBN: 978-0-470-84528-8, by Luis Castaner and Santiago Silvestre, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2012-0579 号

图书在版编目（CIP）数据

光伏系统的 PSpice 建模/（西）喀斯特纳，（西）塞维斯特著；张晓强等译.
—北京：机械工业出版社，2014.7

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Modelling photovoltaic systems using pspice

ISBN 978-7-111-47479-1

Ⅰ.①光… Ⅱ.①喀…②塞…③张… Ⅲ.①太阳能发电－电子电路－计算机辅助设计－应用软件－系统建模 Ⅳ.①TM615②TM702

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 169930 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：江婧婧　责任编辑：江婧婧

版式设计：霍永明　责任校对：刘雅娜

封面设计：马精明　责任印制：李　洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.5 印张 · 389 千字

0 001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-47479-1

定价：88.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**

内容提要

● 介绍太阳辐射、标准光谱和通用计算机仿真软件(PSpice)的基础知识。

● 介绍频谱响应及其PV电池短路电流的PSpice简化模型。

● 介绍PV电池的伏安特性及其环境影响。

● 介绍太阳电池阵列、地面PV模块以及PV发电组件建模方法。

● PV模块与典型负载匹配以及蓄电池的建模。

● 功率调节与逆变器建模。

● 介绍独立运行的PV系统

● 并网型PV系统。

● 若干典型的小功率应用系统。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎江婧婧

国际视野　科技前沿

国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果　搭建电气工程技术平台

《光伏系统的PSpice建模》
《现代电力电子学中的瞬态分析》
《配电系统》
《风资源评估：风电项目开发实用导则》
《风力发电技术与工程应用》
《电池系统工程》
《微电网和主动配电网》
《双馈感应电机在风力发电中的建模与控制》
《高性能交流传动系统 —— 模型分析与控制》
《光伏发电系统的优化 —— 建模、仿真和控制》
《覆冰与污秽绝缘子》
《高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用》
《MATLAB数值分析方法在电气工程中的应用》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《车辆能量管理：建模、控制与优化》
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
《电动汽车技术、政策与市场》
《永磁无刷电机及其驱动技术》
《先进电气驱动的分析、建模与控制》
《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》
《智能电网中的电力电子技术》
《高效可再生分布式发电系统》
《分布式发电——感应和永磁发电机》
《电力系统谐波》
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
《高压输配电设备实用手册》
《电力变流器电路》
《电力系统中的电磁兼容》
《超高压交流输电工程》（原书第3版）
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
《配电可靠性与电能质量》

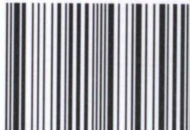


WILEY

Copies of this book sold without a Wiley Sticker on the cover are unauthorized and illegal

上架指导　电力电子技术

ISBN 978-7-111-47479-1



定价：88.00元